



TITLE:

貯水池における水温、濁度ならび  
に富栄養化指標の予測に関する水  
理学的研究( Dissertation\_全文 )

AUTHOR(S):

松尾, 直規

---

CITATION:

松尾, 直規. 貯水池における水温、濁度ならびに富栄養化指標の予測に  
関する水理学的研究. 京都大学, 1982, 工学博士

ISSUE DATE:

1982-07-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r4756>

RIGHT:

貯水池における水温，濁度ならびに  
富栄養化指標の予測に関する水理学的研究

昭和57年3月

松 尾 直 規

# 貯水池における水温，濁度ならびに 富栄養化指標の予測に関する水理学的研究

昭和57年3月

松 尾 直 規

# 目 次

緒 論 .....	1
第 1 章 貯水池における水理・水質現象の実態とその特徴 .....	7
1.1. 概 説 .....	7
1.2. 貯水池の水理・水文性格 .....	9
1.2.1. 貯水池の水理・水文特徴とその表示 .....	9
1.2.2. 水理・水文指標によるわが国多目的貯水池の分類・評価 .....	13
1.3. 水温分布及びその変動特性 .....	22
1.3.1. 成層型貯水池における水温分布の特徴 .....	22
1.3.2. 洪水時における水温成層の変形・破壊 .....	23
1.4. 濁度分布特性と濁水長期化現象 .....	32
1.5. 富栄養化と関係する各種水質濃度の分布特性 .....	38
第 2 章 貯水池水理の解析のための数学モデル .....	43
2.1. 概 説 .....	43
2.2. 従来の各種予測モデル .....	45
2.3. 貯水池水理のモデリングのための基礎事項 .....	47
2.4. 貯水池水理の数学モデル .....	48
2.4.1. 基礎原理とその適用 .....	48
2.4.2. 数学モデル .....	49
2.5. 水温、濁度予測のための数学モデル .....	50
2.5.1. 数学モデルの展開とそのための条件 .....	50
2.5.2. 水温、濁度の予測モデル .....	52
2.6. 富栄養化予測のための数学モデル .....	55
2.6.1. 水質指標とその生物学的変化に関するモデル .....	55
2.6.2. 富栄養化の予測モデル .....	63
第 3 章 貯水池における水温、濁度ならびに富栄養化指標の数値解析法 .....	70
3.1. 概 説 .....	70
3.2. 数値解析法 .....	72

3.2.1.	水温、濁度予測のための数値解析法	72
3.2.2.	富栄養化予測のための数値解析法	79
3.2.3.	数値解析法に関する検討	80
3.3.	環境境界条件及び初期条件の取扱い	83
3.3.1.	流出入に関する境界条件	83
3.3.2.	大気との熱交換に関する条件	86
3.3.3.	初期条件	87
3.4.	各種水理条件の取扱い	87
3.4.1.	濁質の粒度分布	87
3.4.2.	分散係数	91
3.4.3.	対流混合	92
3.5.	コントロール・ボリュームの $\Delta x$ 、 $\Delta z$ の値	92
第4章	貯水池における水温、濁度の予測	96
4.1.	概 説	96
4.2.	対象貯水池における入力資料及び解析条件	96
4.3.	解析条件の取扱いに関する実証的検討	109
4.3.1.	濁質粒度分布の効果	109
4.3.2.	分散係数の影響	111
4.3.3.	$\Delta x$ 及び $\Delta z$ の値に関する検討	114
4.4.	水温、濁度の予測例とその考察	118
4.4.1.	種々の数値解析法による結果の比較	118
4.4.2.	早明浦貯水池における予測結果	121
4.4.3.	小見野々、長安口及び川口の3貯水池系における予測結果	124
第5章	貯水池における富栄養化の予測	134
5.1.	概 説	134
5.2.	対象貯水池における入力資料及び解析条件	134
5.3.	室生貯水池における予測例とその考察	142
5.3.1.	現象再現結果	142
5.3.2.	各種水質濃度変化の主要因に関する考察	149
5.4.	生物学的生産・消費モデルの改良とその適用結果	156
結 論		177

## 緒 論

川をせき止め水を貯めることによって、自然水を我々の生活と安全の維持・向上のためにより有効かつ効率良く利用することは、人類が水と拘わりを持ち始めた頃から行われてきたことであり、数多い土木技術のなかでも最も歴史が古いものの一つである。この技術は、言い換れば、自然水のもつ時間的・空間的分布を、人間生活を営む上での種々の目的に合った水、すなわち水資源のそれに変換することであり、実際的には、洪水調節や各種の利水目的のために自然水を貯留し、目的に応じてそれを再配分することである。貯水池は、このために建設される土木施設であり、その目的や機能は近代的な水資源開発計画のなかで、多目的の巨大なダム、貯水池が技術の粋を尽して建設されるようになってからも変わることはなかった。したがって、従来より、その目的や機能を達成するための貯水池管理における重要な課題は、相互に競合・補完する各種の利水目的に応じて貯留水量を調節し、量的配分の最適化を図ることであった。

ところが、生活構造ならびに産業構造の変化に伴ない、水利用の高度化、多様化が進むと、量的な要求ばかりでなく質的なこと、すなわち各用途に応じた性質の水を選択して利用することが要請されるようになってきた。また一方では、流域における開発と人類活動の活発化に伴なって、それまで余り問われることがなかった貯留水の水質問題など、貯水池が自然及び社会経済的環境へ及ぼす悪影響が顕在化してくるところもでてきた。このため、貯水池管理に関する重要課題の一つに、貯留水の質的配分とその水質管理が加えられるようになった。

もともと、貯水池の建設は河川環境にとって大きな変化をもたらすものであり、またその周辺環境へも大きな影響を及ぼす出来事である。例えば、その本来の目的を達成するため、河川の流況変化やそれに伴う種々の地形的変化、さらには貯留水の水質変化ならびに河川及び流域における生態系の変化に直接的あるいは間接的に大きな影響を及ぼすものである。一方同時に、貯水池はそれを囲む種々の環境境界条件に対応して特有の水環境システムを形成し、与えられる様々のインパクトを増幅あるいは変形して再び周辺環境に伝達する作用も有している。

したがって、水需要の増大に伴う貯水池の建設数の増加とその規模の拡大、さらには先に述べたような社会・経済的状況の変化に対応して、貯水池と周辺環境との間の相互的な影響が、貯留水の水質問題という形で顕在化し始めたのは、ある意味では必然的な成り行きであった。しかし、そうした問題が深刻な事態にまで発展するとは、多くの場合、貯水池の建設時には予測できなかったことであり、その意味では全く新しい問題でもある。

これらは具体的には、冷水、濁水長期化及び富栄養化の3つであり、現在、貯水池管理上さらには今後の貯水池計画の推進上、緊急に対策を要すべき重要な技術的課題となっている。

冷水問題は、比較的水深の深い貯水池において形成される夏季の水溫成層に起因し、取水設備

の構造によっては流入水温度より低い温度の水がかんがい期に放流され、農業に悪影響を及ぼすものであり、その影響は魚類の生育など養殖水産の一部にも及んでいる。濁水長期化は、夏の末期から秋にかけての台風シーズンにしばしば発生する大規模洪水の流入に伴ない、それに含まれる多量の微細な懸濁物質が洪水後も長期間貯水池内に滞留し、魚類及びノリ等の養殖水産、観光・レクリエーションなどに種々の障害をもたらす問題である。また、富栄養化は、流域内で自然的、人為的要因によって発生した窒素、リン等の栄養塩の流入とその蓄積に伴ない、貯水池生態系のバランスが崩れ、それによって植物プランクトンの異常発生（水の華、淡水赤潮）など、貯留水の有機汚濁化が進行し、水産上及び景観上の障害を生じさせるとともに、水道原水の悪臭化や浄水場でのろ過閉塞を引き起こす問題である。

このように、各研究課題のもつ問題点は、利水目的上異なったものであり、また、問題の出現した時期や場所も等しくはない。このうち、最初に課題に上がったものは冷水問題であり、昭和30年代前半までの研究によって一応の定性的把握が行われていた<sup>1)</sup>。さらに、他の水工学的諸問題とも関連してほぼ同時期に活発となった密度流現象の研究において、選択取水<sup>2)</sup>や成層流の安定性<sup>3)</sup>及び混合過程<sup>4)</sup>といった関連する課題の研究が進められ、また取水による貯水池水温等への影響が考察されていた<sup>5)</sup>。このため、我が国においても比較的早くから関心を集め、対策として表層取水設備が考えられていた。

しかし、濁水長期化については、この時期に二、三の現地調査報告<sup>6),7)</sup>があった程度で、まだ余り関心が寄せられず、これに関する研究が活発に進められるようになったのは、吉川（1971）ら<sup>8)</sup>によりその実態が詳細に考察されて以後のことである。また、富栄養化の問題は、天然湖沼においては以前から知られ、陸水学、生態学の分野で定性的把握を中心とした研究<sup>9)</sup>が行われていたが、貯水池でこの問題が顕在化し始めたのは昭和40年代半ば以降であり、さらに技術的課題として本格的な研究が始められたのは、ごく最近のことである。

一方、こうした状況にあった3つの研究課題が、行政レベルでも全国的な規模をもった懸案技術課題として取り上げられ、本格的な調査研究が始められたのは昭和40年代後半からであり、建設省においても、関連機関と協力して、昭和49年度より「ダム貯水池に関する水質調査委員会」<sup>10)</sup>が設置され、まず各課題の全国的な分布とその意義の調査が実施された。一方、土木学会水理委員会においても、昭和50年、52年、53年の水工研修会<sup>11)~13)</sup>と52年の水理講演会<sup>14)</sup>でこれらの課題を集中的に取り上げたことから、各種研究機関での、関連した調査研究ならびに実験的研究がより活発化すると同時に、数学モデルによる数値解析手法の開発と応用が進められ、これらに関して活発な議論が交わされるようになってきた。

その結果、こうした組織的かつ詳細な調査研究によって各課題の実態が徐々に明らかにされると同時に、水温成層流や泥水密度流など、各課題に関連した個々の現象についての理論的・実験的研究の成果が、いくつか集積されつつある<sup>15),16)</sup>。一方では、これらの基礎的研究成果に基づく貯水池水温・水質の予測解析手法が、Huber・Ryan・Harleman<sup>17)</sup>のいわゆるM. I. T. モデルに追

随する形で、いくつか開発され<sup>18),19)</sup>、その適用性が実証されるとともに、さらにその発展が図られてきている<sup>20),21)</sup>。また、各課題に対する技術的対策手段の検討も、二、三行われるようになってきた<sup>22)</sup>。

こうして、各課題に対する社会的関心の高まりのなかから、貯水池における水温・濁水・富栄養化の各現象が徐々に明らかにされてきたが、未だに不明な点も少なくない。とくに富栄養化の問題に関しては、観測すら不十分な現状であり、今後の課題は数多い。また、上述したような従来の諸研究においても、現象の認識あるいは方法論の選択などに疑問が残る点もいくつかある。以下にこうした諸問題を要約すれば、次のようである。

- i) 各現象の把握に関しては、その時間的・空間的スケールに応じた十分な調査・考察が行われているとはいえず、洪水時における水温成層破壊ならびに濁水の伝播過程、また富栄養化関連水質の変化については、さらに調査研究が必要であろう。
- ii) 各課題に関連した基礎的な実験研究は、個々の現象を単純化した条件のもとで取り扱ったものであり、その成果を、複雑な幾何形状ならびに環境境界条件のもとで全く異なる時間的・空間的スケールをもつ実際の貯水池へただちに適用することには問題が多い。また、このため、実験的研究では個々の一連の現象を総合化し各課題の全体像を把握することが、十分に行い得ない。
- iii) 従来の数値解析モデルでは、流れの運動学的挙動を表わす運動量保存則を省略し、選択取水等に関する研究成果を代用しているため、複雑な現実の挙動を十分に明らかにすることができない。また、水温成層破壊や濁水及び富栄養化現象については、各現象の時間的・空間的スケールに応じた取扱いならびに解析スケールを用いて、水理学的に妥当かつ十分な精度の解析が行われているとはいえない。
- iv) 富栄養化については、流れの運動学的挙動及び水温の挙動と各種水質の変化とを同時に取り扱うことが少なく、それらの関係は十分に明らかでない。このため、富栄養化機構及びその特徴の解明も十分でない。
- v) 流入水の濁度・濃度に関する諸特性、濁度物質の性状とその沈降速度、各種水理量の分散係数など、水理解析のための各種の条件については、さらに検討すべき点が少なくない。

以上、貯水池における貯留水の質的管理に関する3つの課題、冷水・濁水長期化・富栄養化について、その問題の背景及び意義とこれまでの研究経過ならびにその問題点の概要を述べてきた。

著者は、こうした諸点を念頭におき、これらの課題の実態とその諸特性の把握ならびにこれらを対象とした貯水池水理の解析手法の開発と応用に努めてきた<sup>23)~29)</sup>。本論文はそうした研究成果をまとめたものである。なお、ここでいう貯水池水理とは、対象とする貯留水の性質すなわち水温、濁度、富栄養化関係物質の濃度が、貯水池を囲む環境境界条件に応じて貯水池内でどのような水理学的変化を示すかを取り扱うことである。したがって、本論文は次の5章から構成されている。



第1章では、上述の3課題に関係する貯水池の水理現象を時間的・空間的スケールより整理した後、まず、比較的大きなスケールからみた貯水池の水理・水文の特徴について述べ、その分類・表示法に基いてわが国多目的貯水池の定性的性格を評価・検討する。つぎに、成層型貯水池のいくつかを例に、各課題に関係する水温、濁度及び富栄養化指標の分布と変化特性を上述のi)の観点より詳細に考察し、その水理学的特徴を明らかにする。

第2章では、上述したiii), iv)の問題点を考慮し、第1章で得られた知見に基いて開発した貯水池水理の解析のための数学モデル、すなわち貯水池における水温、濁度ならびに富栄養化指標の予測モデルを説明する。これらのモデルは、流体力学原理を出発点に、貯水池を水深方向及び流れ方向に分割したブロックについて展開されたもので、運動量保存則を含む点に特徴がある。

第3章では、第2章で得られた各水理解析モデルによる数値解析法に関して、解析対象とする諸現象の性質に応じた計算法の説明と、それに関する技術的諸問題の考察を行うとともに、先のv)に述べた観点から、実際の解析にあたっての諸条件を水理学的に検討する。

第4章では、以上の成果を用いて実際のいくつかの貯水池を対象に、水温及び濁度の変化を種々の条件のもとで数値解析したいくつかの例を示し、それらの結果を現象の再現性を中心に種々の観点より考察する。得られた結果に基き、2章及び3章で述べた数学モデルならびに数値解析法の水温、濁度予測への適用性を論ずる。

第5章では、第4章と同様に、実際の貯水池における富栄養化現象の数値解析例を示し、これに関するモデルの適用性を検討するとともに、流れの運動学的挙動及び水温分布特性との関連に基いて、環境境界条件に対応した貯水池の富栄養化過程を考察する。

最後に、これらの研究によって得られた成果を総括して結論とする。

## 参 考 文 献

- 1) 例えば、吉村信吉；湖沼学，三省堂，1937.
- 2) 例えば、Harleman, D.R.F., Morgan, R.L. and Purple, R.A.; Selective Withdrawal from a Vertically Stratified Fluid, Proc. 8th Congress of IAHR, Vol.2, Paper 10-C, August, 1959.
- 3) 例えば、Lamb, Sir H.; Hydrodynamics, 6th edition, Cambridge, 1963, pp.373~374.
- 4) 例えば、Ellison, T.H. and Turner, J.S.; Turbulent entrainment in stratified flows, Jour. Fluid Mech. Vol.6, 1959, pp.423~448.
- 5) 例えば、M.A. Churchill; Effects of impoundment of water quality, Trans. of ASCE, Vol. 123, No.2928, 1958, pp.419~464.
- 6) 小島貞男；小河内ダム湛水に伴う多摩川系の水質変化とその対策について，水道研究，第37号，1959，pp. 31~41.
- 7) 細川巖；ダム湛水後の河川水濁度変化について，用水と廃水，Vol.9，No12，1967，pp.

893～906.

- 8) 吉川秀夫・山本晃一；貯水池の水の挙動に関する研究，土木学会論文報告集，第186号，1971，pp. 39～54.
- 9) 前出の1)，あるいは津田松苗；陸水生態学，共立出版，1974.
- 10) 国土開発技術研究センター；第1回ダム貯水池に関する水質調査委員会議事録，1975年3月.
- 11) 安芸周一；貯水池濁水現象，1975年度水工学に関する夏期研修会講義集，75-A-1，土木学会水理委員会，1975年8月.
- 12) 足立昭平；貯水池汚濁現象，1977年度水工学に関する夏期研修会講義集，77-A-5，土木学会水理委員会，1977年7月.
- 13) 安芸周一；貯水池の環境，1978年度水工学に関する夏期研修会講義集，78-A-2，土木学会水理委員会，1978年7月.
- 14) 土木学会水理委員会；第21回水理講演会講演論文集.
- 15) 例えば日野幹雄・大西外明；成層密度流におよぼす Point Sink の高さの効果，土木学会論文報告集，第163号，1969，pp. 39～48.
- 16) あるいは芦田和男・江頭進治；泥水密度流に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第237号，1975，pp. 37～50.
- 17) Huber, W.C., Harleman, D.R.F. and Ryan, P.J.; Temperature prediction in stratified reservoirs, Proc. ASCE, Vol.98, HY-4, 1972, pp.645～666.
- 18) 岩佐義朗・野口正人・児島章；ダム貯水池の水温成層予測法について，京都大学防災研究所年報，第18号B，1975，pp. 565～574.
- 19) 安芸周一・白砂孝夫；貯水池流動形態のシミュレーション解析，発電水力，No 134，1975，pp. 37～50.
- 20) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭；洪水時における貯水池の成層破壊について，京都大学防災研究所年報，第20号-B，1977，pp. 259～270.
- 21) 宮永洋一・白砂孝夫；貯水池内の濁度の二次元解析，土木学会第32回年次講演会概要集，第Ⅱ部，1977，pp. 336～337.
- 22) 水資源開発公団，国土開発技術研究センター；ダム濁水解析のための水質解析調査報告書（その2），1979.
- 23) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭；ダム貯水池の水温予測，京都大学防災研究所年報第19号-B，1976，pp. 221～236.
- 24) 前出の20).
- 25) 綾史郎・岩佐義朗・松尾直規；濁質の流送過程について，第22回水理講演会論文集，1978，pp. 131～138.
- 26) 岩佐義朗・松尾直規・井上素行；貯水池における濁度解析について，京都大学防災研究所年

- 報第21号-B, 1978, pp. 319～329.
- 27) 岩佐義朗・松尾直規・俞朝夫; 貯水池水理の数値解析法とその適用について, 京都大学防災研究所年報第22号-B, pp. 341～354.
- 28) 小林正典・岩佐義朗・松尾直規; わが国多目的貯水池の水理・水文的特徴とその評価, 第24回水理講演会論文集, 1980, pp. 245～250.
- 29) 松尾直規・岩佐義朗; 貯水池における水理特性の変化とその予測, 第24回水理講演会論文集, 1980, pp. 251～258.

# 第1章 貯水池における水理・水質現象の実態とその特徴

## 1.1. 概 説

貯水池は、河道をダムでせき止めて造られた土木施設であり、天然湖沼にはみられない特殊な水理特性を有している。すなわち、貯水池では貯水容量に比して流出入量が比較的大きく、しかも細長い平面形状と流下方向に水深が変化するくさび形の縦断面形状をもち、水表面積に比べ水深が深いといった形態の特徴に加え、余水吐、取水口などの人工施設による貯水池操作が実施されるために、貯留水の水位、流れの運動、水温、濁度及び栄養塩濃度などの水理要素や関連する生態系の挙動が、それらの影響を受けて複雑な変化を示すことが多い。

たとえば、比較的水深の深い貯水池では、天然湖沼と同様に、春から夏にかけての受熱期に水温成層が形成されることはよく知られているが、天然湖沼におけるその発達と変化は太陽エネルギーの供給によりほぼ一義的に決定されるのに対し、貯水池のそれは、上述した諸要素の影響を受けて多様な成層形態と様々な変化を示す。

また、貯水池の水理現象は、その自然的・人為的な環境境界条件に対応して、種々の時間的・空間的スケールのものから構成されている。たとえば、貯水池の定性的性格として代表される水理・水文的特徴は、年間の流況、貯水池の形態及び水温分布、また貯水池の地理的位置、流域の地形・地質・気候条件などに関係し、比較的大きな時間的・空間的スケールのものである。一方、洪水の流入に伴う成層破壊過程や濁水塊の流下・伝播過程などは、両スケールともに比較的小さな現象である。

したがって、貯水池における水理現象の実態とその特徴を明らかにするには、こうした時間的・空間的な各種のスケールに応じて各現象を整理し、その上で、上述したような諸条件や、流れの運動学的挙動、濁質沈降速度及び生物学的生産・消費率などの力学的・運動学的要素との関連から、各現象の把握を進めなければならない。

そこで、いま対象とする貯水池の水理現象及びその特徴を、関連する境界条件ならびにそれらの時間的・空間的スケールより整理すると、表-1-1のようである。この表に示した各特性は、もちろん密度や比熱などの貯留水の性質、上述した力学的・運動学的要素、ならびに貯水池容量、貯水池、水深などの流れの場の特性量にも関係するものであることはいうまでもない。

このうち、冷水、濁水長期化、富栄養化の課題を定量的に論ずるためには、同表の下から3つ目までのものを取り扱う必要がある。ところが、これらの現象特性は、より大きなスケールからみた貯水池の水理・水文的特徴に支配され、貯水池毎に異なるのがふつうであり、それに応じて、解析に用いる数学モデルも変わってくる。したがって、上述の3課題を取り扱うためには、まず、

表一1ー1 貯水池における水理現象の時間的・空間的スケール

水理現象・水理特性	関係要素（環境境界条件）	時間スケール	空間スケール	用いられる解析法
水理・水文的性格 水温・水質値のレベル 富栄養化の程度 など	年間流入量，地理的位置， 地質，地形，気候条件 流域の植生及び産業構造 など	1年以上	貯水池規模以上	水温成層による定性的分類 平均年回転率 平均的内部フルード数 Vollenweiderの富栄養化指 標 など
水深方向の水温分布特性 濁度を除く水質分布特性 など	気温の季節的変化 流出入水温の季節的変化	季節あるいは月	貯水池規模	システム解析法
平常時の水温・水質値の 変化 など	流出入流量，流出入水温・ 濁度・濃度，気象条件の日 平均変化	数日～1週間程度	水深方向に1～数m 流れ方向には貯水池長 あるいはそれ以上	二層流・三層流モデル 鉛直一次元多層モデル
成層破壊時を除く洪水期 の水温変化 洪水後の貯留過程におけ る濁度変化 植物プランクトン異常増 殖時の各種水質変化 など	同 上	1日程度	流れ方向に1～数km 水深方向に1～数m	鉛直一次元多層モデル 二次元モデル
洪水期における濁度・濃 度の流下伝播過程 成層破壊時の水温変化 表面水温の日変化 など	洪水期の流量・濁度・濃度， 気象条件の時間変化	1時間 あるいはそれ以下	流れ方向に100～数百 m あるいはそれ以下 水深方向に1～数m あるいはそれ以下	

対象とする貯水池の水利・水文の性格を巨視的に把握し、その上でより詳細かつ定量的な検討を進めていくことが必要となる。

以上より、本章では、まず比較的大きな時間的・空間的スケールからみた貯水池の水利・水文の性格とその分類及び表示法について述べ、これに従ってわが国多目的貯水池を長期間の資料を用いて分類・評価した結果を種々の観点より考察する。ついで、こうした定性的性格のうち、上述の3課題が問題になることの多い成層型貯水池のいくつかを対象に、水温、濁度及び富栄養化指標の時間的・空間的变化の実態とその特徴を詳細に明らかにし、定量的な取扱いに必要な基礎的知見を抽出する。

## 1.2. 貯水池の水利・水文の性格

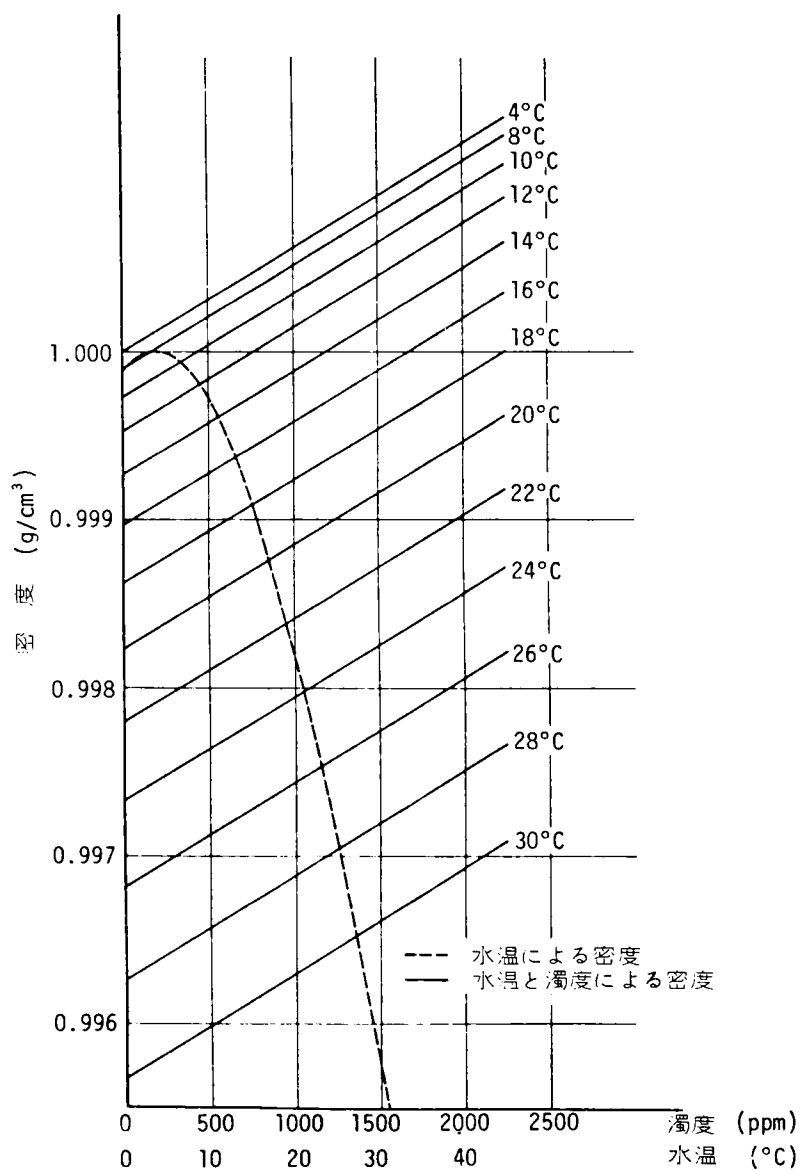
### 1.2.1. 貯水池の水利・水文の特徴とその表示

一般に、水利現象の記述は、流体の性質、流れの運動学的特徴、流れの場の3側面から整理される<sup>1)</sup>。貯水池水利に関していえば、流体の性質、すなわち貯留水の水温、濁度、栄養塩濃度などは物理的・化学的・生物学的要素であり、これらは貯水池を囲む環境境界条件に応じて様々な挙動を示す。ところが、これらの各挙動を水理学的立場からみると、その要素は、水の密度、粘性係数など連続体としての水の物理的性質を表わすものに限られてくる。一方、流れの運動学的特徴は、速度、加速度、圧力などの力学的・運動学的要素によって表わされ、また、流れの場の特徴は、貯水池容量、貯水池長、平均水深など流れの空間的スケールを表わす特性量により記述されるであろう。

このうち、貯留水の水理学的挙動の特徴を表わす最も重要な水理要素は、貯留水の性質の物理的・化学的・生物学的変化に大きな影響を及ぼす水の温度であろう。貯留水の密度は水温及び濁度の関数であるが、濁度の影響は図-1-1に示すように、極めて高濁度の水を除いて非常に小さく、密度を支配する主要素は水温であると考えられる。また、水の粘性係数も水温の関数である。したがって、貯留水の性質とその水理学的変化の特徴を代表する水理要素は水温であり、その分布と変化特性によって貯水池の水理的性格が決定されるといえる。

一方、こうした貯水池の水利に関係する環境境界条件のうち、地形形態は別として、最も重要なものは、貯水池の水文の性格を特徴づける要素としての流入流量であろう。もちろん、貯水池よりの流出流量ならびに流入水温、濁度（濃度）も重要な境界条件であるが、気温変化に関係が深い流入水温は別として<sup>2)</sup>、他はいずれも流入流量の変化に従属したものと考えられる<sup>3)</sup>。したがって、貯水池の定性的性格を構成する水文要素の特徴は、貯水池への流入流量により代表されるといっても過言でない。

以上に述べたように、貯水池の定性的性格は、水理要素としての貯留水の密度分布すなわち水温分布と、水文情報としての流入流量の各特性により表現されうると考えられる。しかし、これ



図一—1 水の密度に及ぼす水温・濁度の影響

らの要素と貯水池の規模、幾何形状及び環境条件等との関連に基いた貯水池の水利・水文的特徴の表示法は、まだ十分に明らかでない。ところが、これらの変化が洪水時を除いて比較的時間スケールが大きく、むしろ季節的あるいは経年的なものであることから、年間を通じての流入流量及び水温分布の変化を調べ、その特徴を抽出し分類することはすでに行われている。

たとえば、岩佐・野口<sup>4)</sup>らは、建設省直轄管理ならびに水資源開発公団、都道府県管理のわが国多目的貯水池における年間の流入流量、等水温線図を作成し、これらの水利・水文的特徴を次

のように分類している。

- 1) 成層Ⅰ型（輻射・成層型）：太陽エネルギーを主要因とする水温成層が形成されるもの
  - 2) 成層Ⅱ型（移流・成層型）：1)の要因よりむしろ流出入流量に伴う移流熱量を主要因とする水温成層が形成されるもの
  - 3) 中間型：盛夏期において弱い水温成層が発達するが、その期間は短く、これを除けばほぼ一様水温であるもの
  - 4) 混合型：年間を通じて明瞭な水温成層は形成されず、水温分布はほぼ一様であるもの
- また、1), 2)に属する貯水池の中には、いずれかに明確に分類できない中間的なものもあるとされている。

これらの分類は、ある1ヶ年（1971年）の水理・水文資料より得られたものであるが、長期間の資料を調べてみると、同一の貯水池でもその特徴が、上述のいずれにも変化しうることがある<sup>5)</sup>。たとえば、図-1-2は矢作貯水池の1973年5月～1975年9月の間における等水温線、流入流量図であるが、これから貯水池の特徴も、流入洪水の有無などの諸条件によって、1973年は成層Ⅱ型、1974年は成層Ⅰ型、1975年には中間型または混合型というように、種々に変化することがわかる。

また、実用上こうした貯水池の特徴を何らかのパラメータで表示し、分類する試みも2, 3行われている。安芸・白砂は<sup>6)</sup>、従来より貯水池の水文指標として用いられていた年間総流入量 $Q_0$ 。

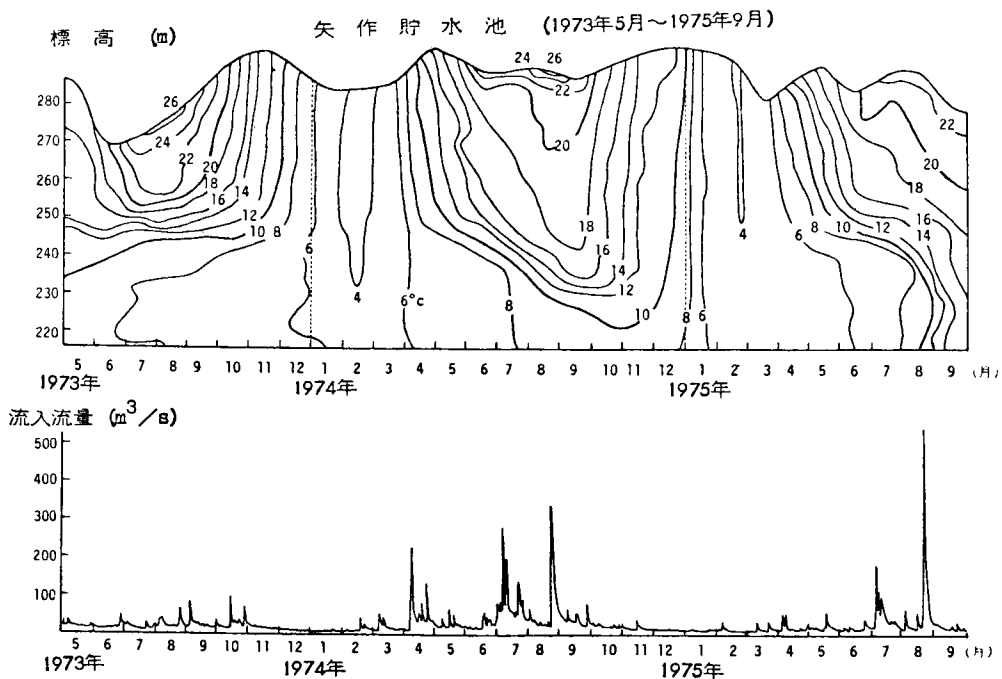


図-1-2 矢作貯水池における水温分布の経年変化



と総貯水容量  $V_0$  との比, すなわち平均年回転率  $\alpha$

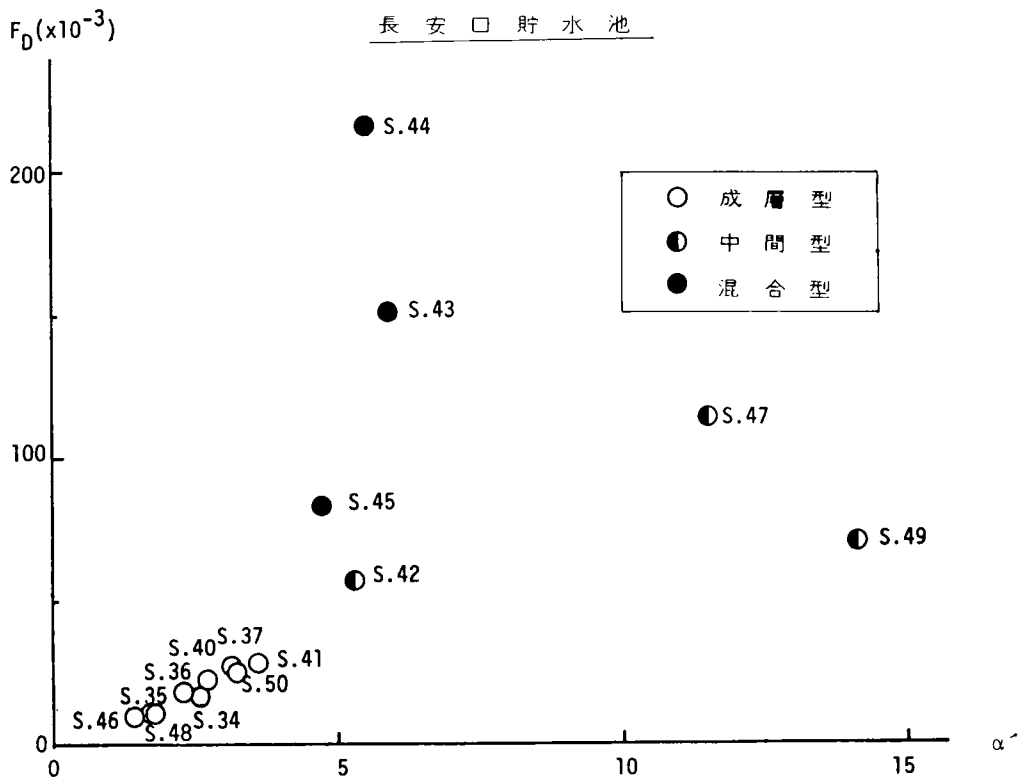
$$\alpha = Q_0 / V_0 \quad (1-1)$$

の値を水温成層の発達との関連パラメータとし, これが10以下であれば成層型, 20以上では混合型であると報じた。一方, 米国 W.R.E. のレポート<sup>7)</sup>では, 水温成層の安定性指標として平均的內部フルード数  $F_D$  を定義し, これによって貯水池の成層状態を論じた。この  $F_D$  は,

$$F_D = \frac{L}{H_0} \cdot \frac{Q}{V_0} \sqrt{(\rho_0 \cdot g) / \left( \frac{d\rho}{dz} \right)} \quad (1-2)$$

で定義され, この値が  $1/\pi$  ( $\approx 0.318$ ) を越えると, 不安定な混合型貯水池になるとされている。ここに,  $L$ : 貯水池長,  $H_0$ : 平均水深,  $Q$ : 年平均流入流量,  $\rho_0$ : 基準密度,  $g$ : 重力加速度,  $-d\rho/dz$ : 受熱期の密度勾配である。ところが, わが国における貯水池の実態を明らかにするには,  $\alpha$  あるいは  $F_D$  のいずれによっても不十分であることから, 岩佐・野田<sup>8)</sup>は, 両指標の値を用いてわが国多目的貯水池の分類結果を整理し,  $F_D$  がほぼ0.01以下,  $\alpha$  が10以下で成層型となることを示すと同時に,  $F_D$  と  $\alpha$  との関係について考察した。

さらに, 著者らは<sup>9)</sup>, 水温成層形成に最も支配的な太陽エネルギー活動が活発な7月を基準に



図一1-3 長安口貯水池における7月の  $F_D$  と  $\alpha'$  との関係

として水理・水文要素を取り扱う方が、より实际的であると考え、 $\alpha$ に代えて、

$$\alpha' = Q_M / V_0 \quad (1-3)$$

を定義し、この値と、(1-2)式の $Q$ 、 $-d\rho/dz$ に7月の平均量を用いた $F_D$ の値とによって、長安川貯水池の長期間にわたる成層状態を整理し、その特徴の経年変化を考察した。ここに $Q_M$ ：7月の総流入量である。図-1-3はその一例で、長安川貯水池の昭和34年～50年における成層状態と $\alpha'$ 、 $F_D$ との関係を示すものであるが、これから、成層型の各年には、 $\alpha'$ と $F_D$ は一次的な関係をもち、この関係より外れた年が中間型、混合型となる傾向がわかる。こうした傾向は、その後、わが国多目的貯水池の多数を対象とした調査<sup>10)</sup>でも確められているが、 $\alpha'$ と $F_D$ との関係を示す直線の傾きは、各貯水池によって若干異なるようである。

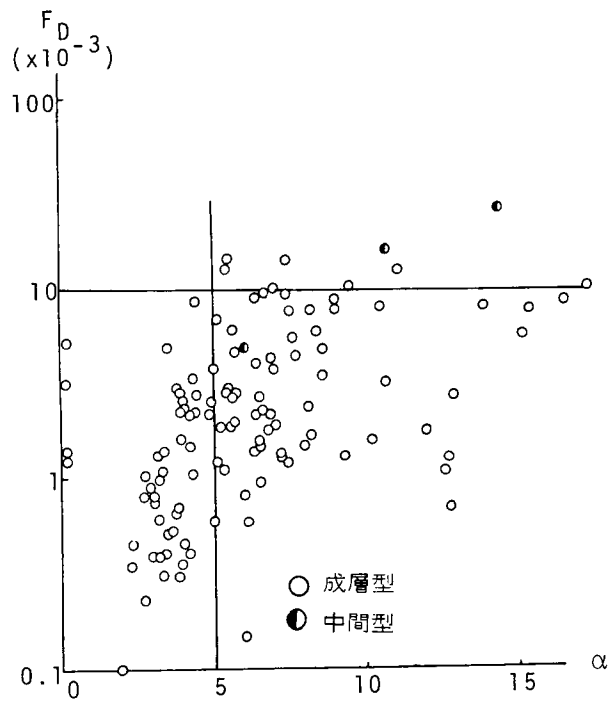
### 1.2.2. 水理・水文指標によるわが国多目的貯水池の分類・評価

これまでの検討から、貯水池の水理・水文的特徴は、 $\alpha$ あるいは $\alpha'$ 、7月の $F_D$ の値を指標として分類・評価しうるのである。そこで、ここでは、長期間の資料が整備されている建設省関連の全国38ヶ所の多目的貯水池を対象に、昭和38年～50年（なかには、数年の資料によるものもある）の各年の成層状態を調べ、これらを先に述べた成層Ⅰ型、成層Ⅱ型、中間型、混合型に分類して、7月の $F_D$ 及び $\alpha$ 、 $\alpha'$ の値との関係を考察してみよう。

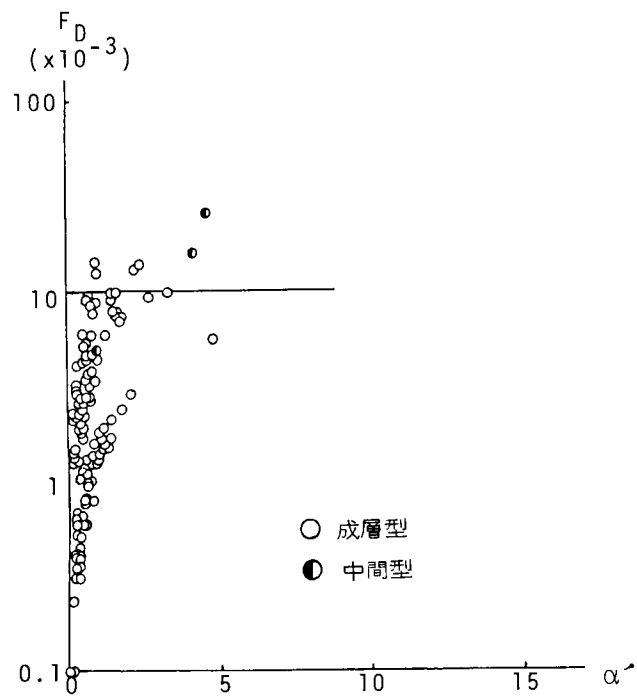
得られた結果は図-1-4～9に示すようであり、図-1-4、5には、通常成層Ⅰ型となる19の貯水池、図-1-6、7には、成層Ⅱ型の傾向が強い13の貯水池、図-1-8、9には中間型、混合型となることが多い6の貯水池について上述の関係を示している。

これらの図より、次のような傾向が明らかにできるであろう。

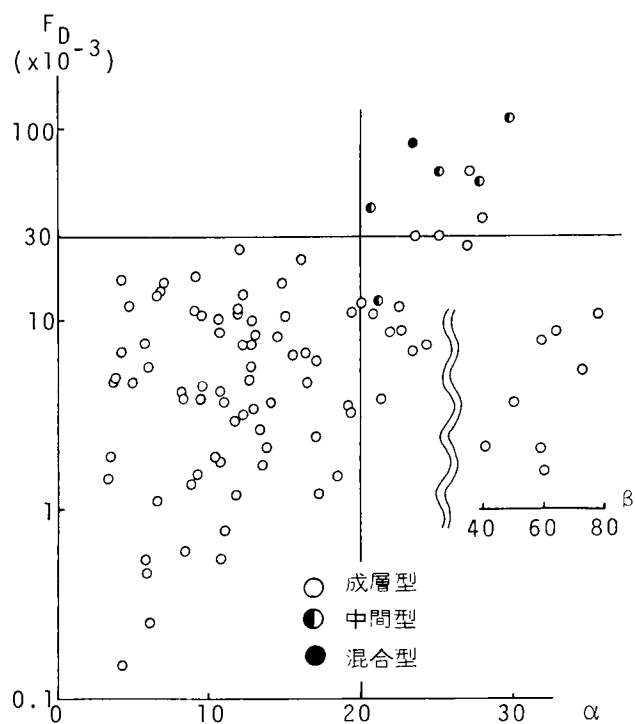
- 1) 成層Ⅰ型の貯水池では、 $\alpha$ が18以下、 $\alpha'$ が5以下と貯水容量に比して流入量が比較的小さく、また $F_D$ はほぼ0.01以下で、しかも $\alpha$ 、 $\alpha'$ との間に正の相関がみられる。すなわち、成層形成とその密度分布が流入量に影響されることはまれで、毎年比較的安定した水理的特徴を示す傾向がある。
- 2) 成層Ⅱ型の貯水池では、 $\alpha$ が3.3～77、 $\alpha'$ が0.1～12.1と広範囲に拡がり、値自体も成層Ⅰ型に比べ大きい。しかし、 $F_D$ が0.03あたりまでは成層型を示す。しかし、 $F_D$ と $\alpha$ 、 $\alpha'$ との間に有意な相関はみられない。これは、成層Ⅱ型の水温成層が貯水池形状及び貯水池操作条件の異なる各貯水池に特有のものであり、また流出入流量の変動の影響を比較的受け易いことを示すものと考えられる。
- 3) ところが、成層が不安定となり、中間型へ移行する場合の $F_D$ 及び $\alpha$ 、 $\alpha'$ の値は、成層Ⅱより成層Ⅰ型の方がやや低い傾向がある。
- 4) 中間型及び混合型の貯水池は、水文的には成層Ⅱ型と同様の特徴を有しているが、水理的には非常に不安定で、 $\alpha$ が10以上、 $\alpha'$ が1以上になると安定した水温成層は形成されない。



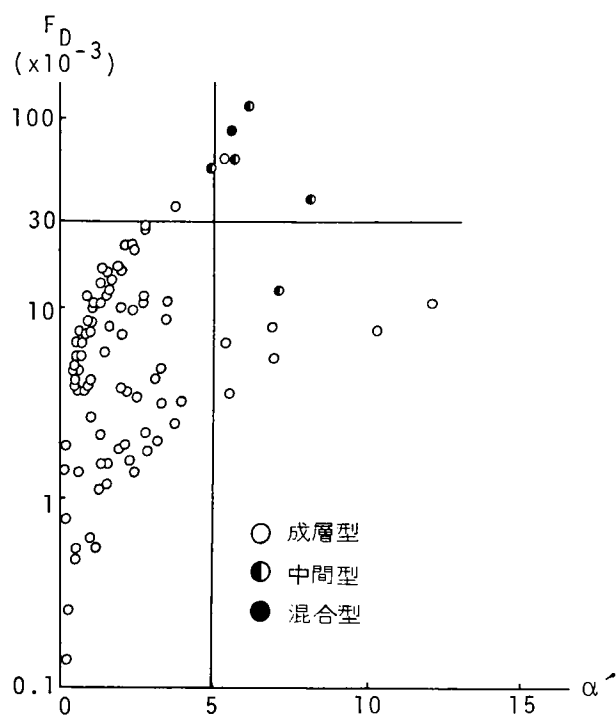
図一1-4 成層I型貯水池における  $F_D$  と  $\alpha$  の関係



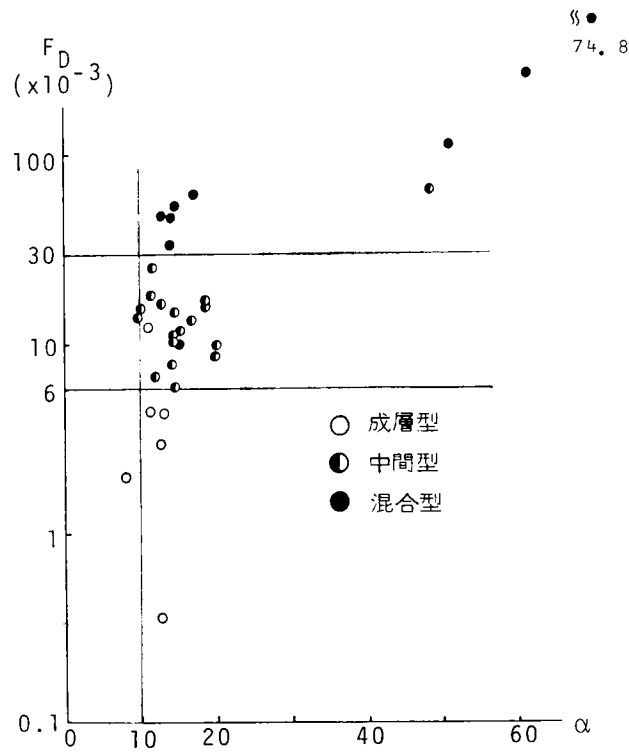
図一1-5 成層I型貯水池における  $F_D$  と  $\alpha'$  の関係



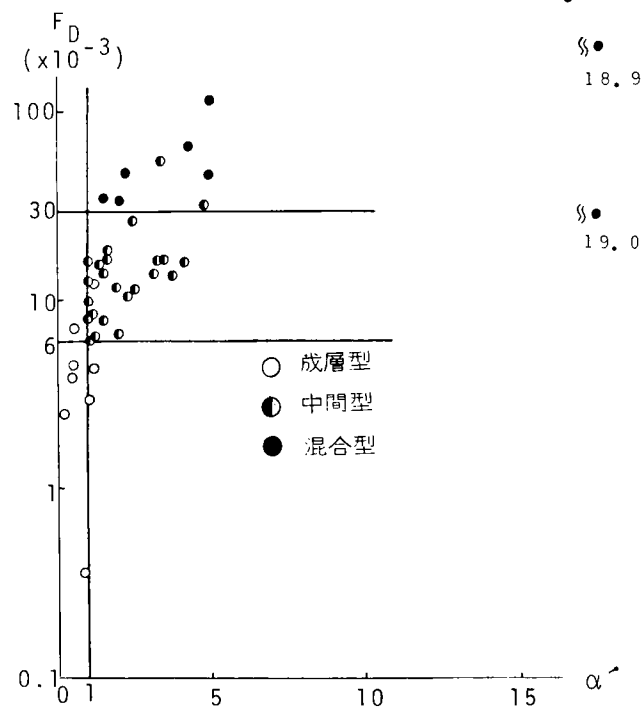
図一—6 成層Ⅱ型貯水池における  $F_D$  と  $\alpha$  の関係



図一—7 成層Ⅱ型貯水池における  $F_D$  と  $\alpha'$  の関係



図一1—8 中間型及び混合型貯水池における  $F_D$  と  $\alpha$  の関係



図一1—9 中間型及び混合型貯水池における  $F_D$  と  $\alpha'$  の関係

表－１－２  $F_D$  及び  $\alpha$ ,  $\alpha'$  による貯水池の定性的性格の評価

定性的性格	$F_D$ 値	$\alpha$ 値	$\alpha'$ 値
成 層 型	0.01以下	10以下	1 以下
成層型（成層Ⅱ型） または中間型	0.01 ～ 0.03	10 ～ 20 （例外あり）	1 ～ 5 （例外あり）
混 合 型	0.03以上	20以上 （例外あり）	5 以上 （例外あり）

$F_D$  の値でみると、0.03 以上ではほとんどが混合型、0.01～0.03では中間型、0.06 以下の年には成層型となるようである。

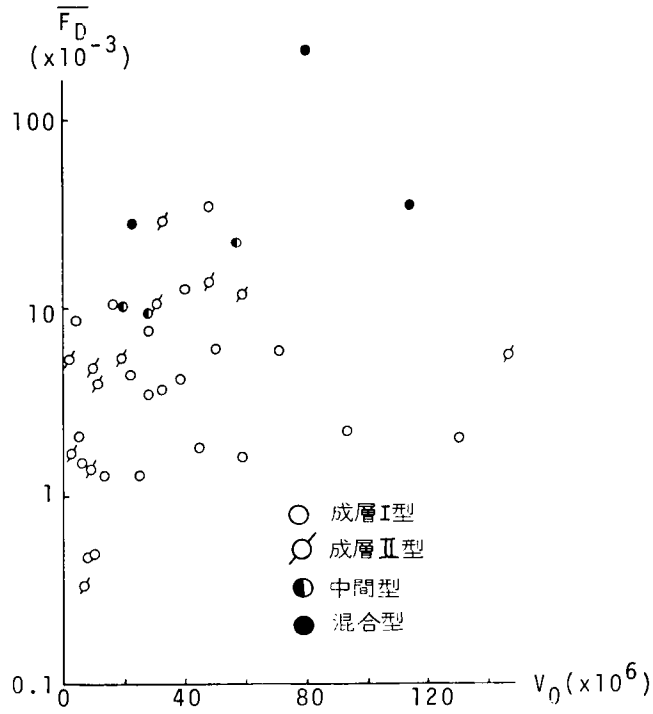
1)～4) の考察に基き、わが国多目的貯水池の水理・水文的性格を  $F_D$  及び  $\alpha$ ,  $\alpha'$  の値で評価してみると、ほぼ表－１－２のように分類できるであろう。ただし、 $\alpha$ ,  $\alpha'$  については、上述したように水温成層の形成要因により判定基準が異なるため、一概には言えない面がある。この表の結果は、先に述べた安芸・白砂<sup>6)</sup>、ならびに岩佐・野口ら<sup>4)</sup>の調査結果をある面で裏付けるものであり、また、行政レベルによるより詳細な調査<sup>11)</sup>においてもほぼ等しい結果が得られている。さらに、この結果を図－１－４～９に示した傾向と合わせてみると、貯水池の定性的性格がその要因との関連から評価され、冷水、濁水長期化・富栄養化の各課題に対し、予備的かつ基礎的な資料を与えることが期待されよう。

つぎに、上述した各貯水池の水理・水文的性格が、貯水池形態及び外的環境条件としての気候・風土といかに関連するかを調べた例が、図－１－１０～１７である。

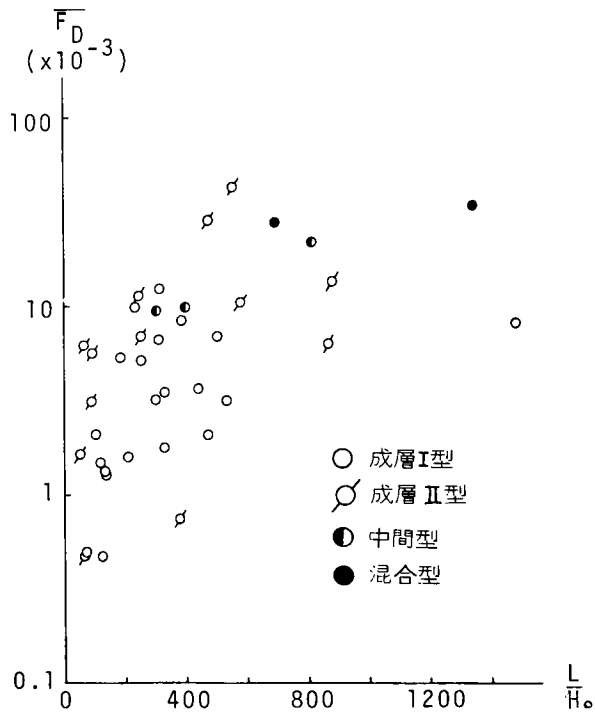
まず、図－１－１０より貯水池規模との関連をみると、成層Ⅰ型貯水池は総貯水容量が大きく、成層Ⅱ型はそれよりやや小さい傾向があるが、中間型、混合型でも容量が大きなものがあり、総貯水容量が大きいほど安定した水温成層が形成されるとは言えないようである。一方、幾何形状との関連をみた図－１－１１の例では、水理的性格がどうであれ、 $L/H_0$  と  $\bar{F}_D$  ( $F_D$  の平均値) の間に正の相関がみられ、水深が深い貯水池ほど水温成層が形成され易く、かつ安定な傾向をもつことがわかる。

図－１－１２、１３には、図－１－３に示したような  $F_D$  と  $\alpha'$  の一次関係を表わす直線の傾き  $\theta$  の値と、 $V_0$  及び  $L/H_0$  との関係を、成層Ⅰ型、Ⅱ型の各貯水池について示しているが、いずれの図においても正の相関が認められ、とくに後者では顕著なことがわかる。これは、水深が浅く細長い形状をもつ貯水池ほど、流量変化に対する  $F_D$  の変化が大きく、受熱期における流量の大小が、水理特性に大きな影響を及ぼすことを示唆するものと考えられる。

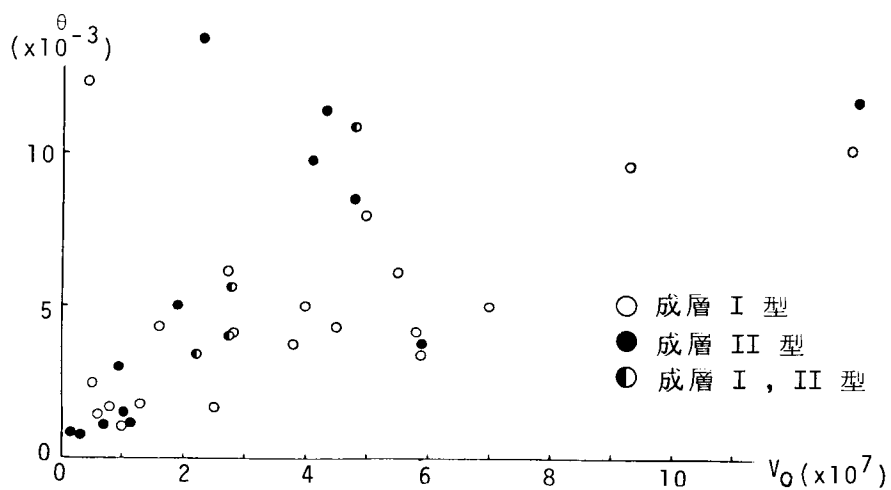
図－１－１４、１５は、各貯水池の水理・水文的性格と気候、風土との関連をみるため、各貯水池を４、５月に相対的に流入量が多い雪解け型と、６、７月の流入量が相対的に多い梅雨型の２つに大別し、それらの月における流入量  $Q_{4,5}$  ならびに  $Q_{6,7}$  と、総貯水容量  $V_0$  との比がそれぞれ  $F_D$  の値といかに関連するかをみたものである。これらの図より、 $Q_{4,5}/V_0$  と  $F_D$  とはほとんど関係しな



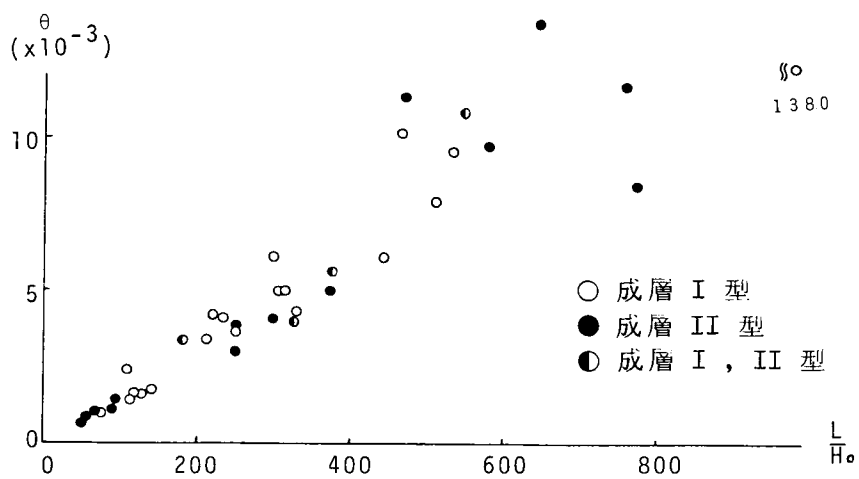
図一1—10  $\bar{F}_D$  ( $F_D$ の平均値) と総貯水容量  $V_0$  との関係



図一1—11  $\bar{F}_D$  ( $F_D$ の平均値) と  $L/H_0$  との関係



図一1-12  $\theta$  と  $V_0$  との関係



図一1-13  $\theta$  と  $L/H_0$  との関係



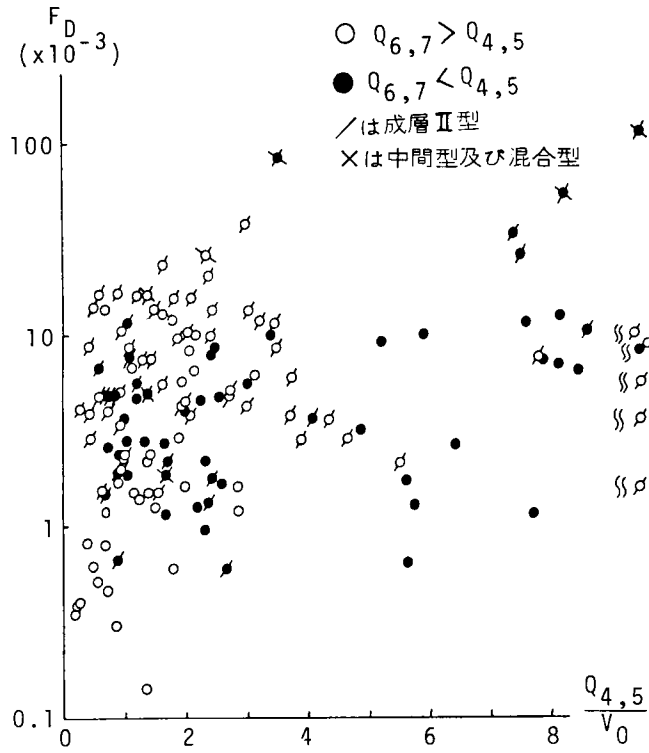


図-1-14  $F_D$  と  $Q_{4,5}/V_0$  との関係

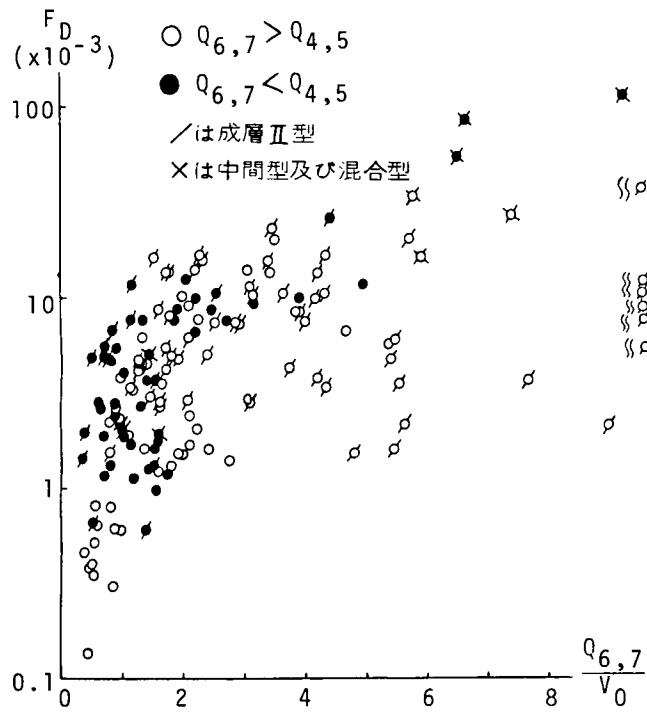
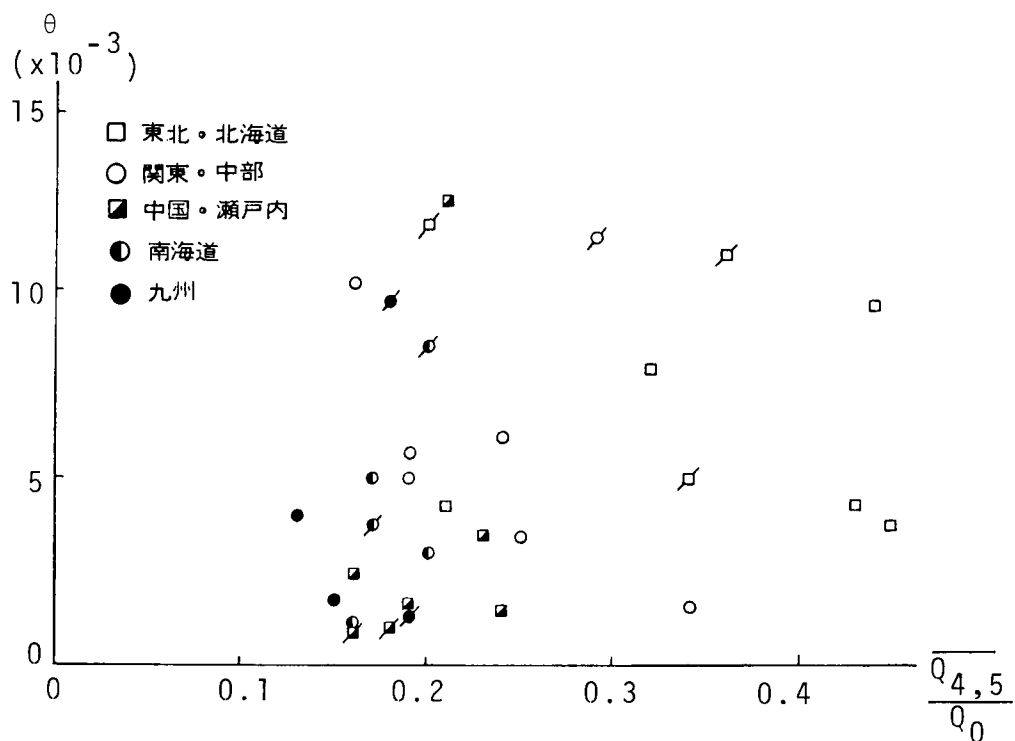
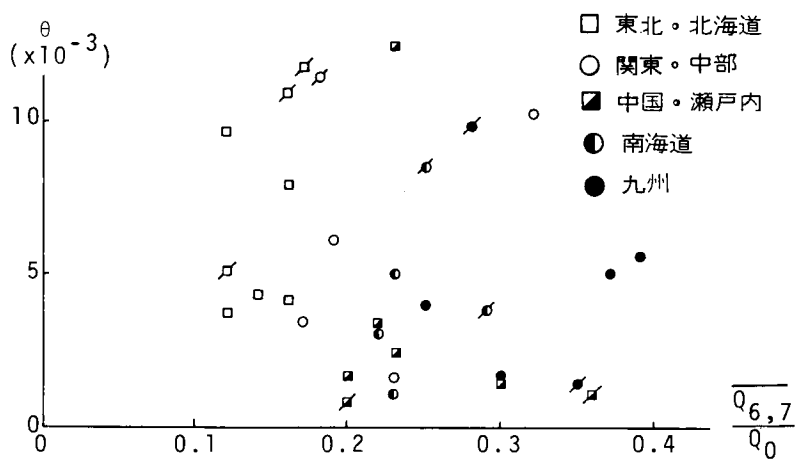


図-1-15  $F_D$  と  $Q_{6,7}/V_0$  との関係



図一1-16  $\theta$  と  $\overline{Q}_{4,5}/\overline{Q}_0$  との関係



図一1-17  $\theta$  と  $\overline{Q}_{6,7}/\overline{Q}_0$  との関係

いが、 $Q_{6,7}/V_0$ と $F_D$ については、雪解け型 ( $Q_{4,5} > Q_{6,7}$ ) の貯水池で比較的相関が認められ、この型のもとでは、雪解け水の流入が終わった後の6月、7月の受熱期における流況が成層形成に少なからず影響することがわかる。

さらに、図-1-16, 17は、各貯水池の $\theta$ と、対象期間内における年間総流入量の平均値に対する $Q_{4,5}$ 及び $Q_{6,7}$ の平均値の比、すなわち $\overline{Q_{4,5}}/\overline{Q_0}$ ならびに $\overline{Q_{6,7}}/\overline{Q_0}$ との関係を、気候区分に準じた地域区分で整理したものである。これらの図より、西日本の貯水池は梅雨型で $\theta$ が比較的小さく、東北・北海道の貯水池は雪解け型で $\theta$ が比較的大きい傾向は認められるようである。

以上では、比較的長い時間スケールからみたわが国多目的貯水池の水理・水文的性格とその表示・分類法について、著者らの調査研究<sup>12)</sup>を中心に述べてきたが、これらの成果は、冷水・濁水長期化問題の判定マニュアルとしても応用されつつある<sup>13)</sup>。しかし、こうした定性的性格と富栄養化問題との関連及びその判定指標など、現段階ではまだ十分に明らかな面も少なくない。したがって、各種資料の調査とその集積による一層の研究が今後とも必要であろう。

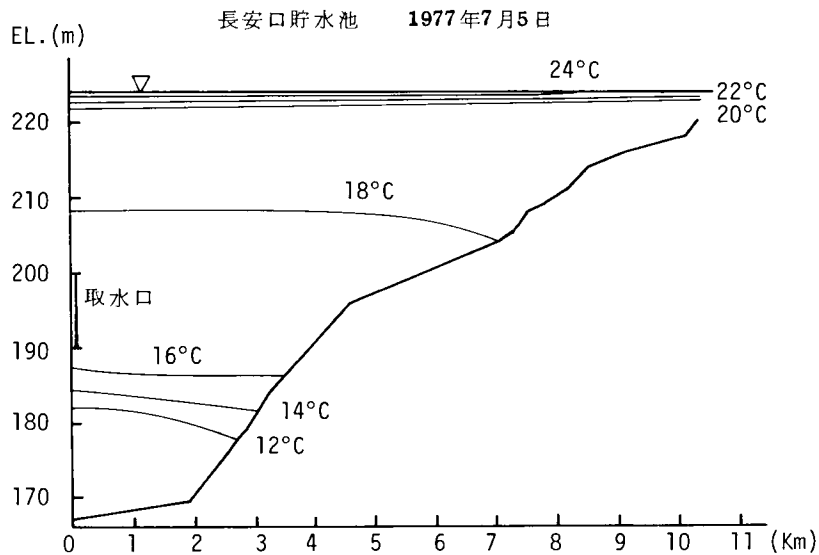
### 1.3. 水温分布及びその変動特性

#### 1.3.1. 成層型貯水池における水温分布の特徴

前節で述べたように、貯水池の水理を特徴づける主要素は水温分布であり、冷水・濁水長期化・富栄養化の各課題を定量的に取り扱うためには、まずその特性ならびに変化の実態を明らかにしなければならない。なかでも、成層型貯水池に形成される夏季水温成層の挙動は極めて重要である。

水温成層は、その形成要因より、日射を主要因とするものと、流出入水に伴う移流熱量を主要因とするものとの2つに大別される。たとえば、図-1-18に示す那賀川水系長安口貯水池における例では、水表面付近にあるのが前者のものであり、取水口よりやや深い位置にあるのが後者のものである。前節で述べた成層Ⅰ型、Ⅱ型の分類は、巨視的にみたときこのいずれが卓越するかによるものであるが、流出入流量、貯水位等の変化によって、短期的には、この例のように両者が混在したり、またいずれが卓越するか判別し難い場合も少なくない。

いずれにせよ、水温成層形成期の水温分布は、貯水池幅方向にはもちろん、図-1-18の例からもわかるように流れ方向にもほぼ一様であり、水深方向にのみ変化する傾向がある。時間的な変化は、気象要素の日変化の影響を受ける水表面のごく近傍を除けば比較的緩やかで、通常はむしろ季節的なものである。すなわち、受熱期から夏に水温成層が発達し、それが秋から冬の放熱期に、水面からの放熱と流入水温の低下に伴ない表水層から徐々に冷却されながら一様化し、冬季にはほぼ消滅して一様分布となるのがふつうである。しかし、貯水池では貯水容量が自然湖沼ほど大きくなく、その上貯水池操作による水位の人工的上昇、低下などがあるために、安定な水温成層が形成されている期間中であっても、洪水の流入があると変温層が低下したり、さらには



図一1—18 成層型貯水池における水温成層例

破壊されるといった成層変化を受けることが少なくない。

このような洪水の流入に伴う水温成層の変形・破壊の場合、受熱期においては、その後しばらくして再び成層が形成されることもしばしばあるが、夏の末期から秋の初めに生じた場合には、成層が一たん破壊されると、翌年の春まで一様な水温分布が継続するのが一般的である。このうち、後者のような場合は、水温成層の破壊により貯水池の水利的性格が成層型から混合型に一時的に移行し、濁水長期化の大きな要因の一つになることが指摘されている<sup>14)</sup>。さらに、まだ十分に明らかではないが、水温成層の変形・破壊は富栄養化現象にも大きな影響を及ぼすことが考えられている。

したがって、水温分布の季節的な変化ばかりでなく、こうした洪水時における変化を把握することも、貯水池の水利特性を明らかにする上で重要である。以下ではこの点について考察を進めることにする。

### 1.3.2. 洪水時における水温成層の変形・破壊<sup>15)</sup>

水温成層の変形・破壊はもともと成層流の流体力学的安定性の問題であり、これに関しては、従来より数多くの研究者により活発な議論が展開されている<sup>16)</sup>。しかしながら、貯水池における実際の現象は、流入洪水の規模及びその流出入条件、成層の位置とその程度、ならびに貯水池規模、幾何形状など、多くの要素が複雑に関係するため、こうした流体力学的安定理論では容易に論じられない性質のものである。したがって、ここでは、天ヶ瀬貯水池において実測された洪水時の詳細な水温分布資料に基いて、この現象の実態とそれに関係する諸要因、さらには水温成

層の安定性に関する判定基準の検討を進める。

天ヶ瀬貯水池は通常成層Ⅱ型に分類されるが、流出入量に比して貯水容量が小さいため、(1971年には $\alpha \approx 173$ )、洪水の流入によって水温成層はしばしば変形を受ける。図-1-19～21は、昭和51年の4月24日～5月14日、5月15日～6月5日、9月5日～30日の各期間に生じたそうした変化の過程を、日平均値による諸量で整理し図示したものである。各図は、上から、等水温線図、貯水位、流出流量、流入水温の各時間的变化ならびに次に示す各種の水理・水文指標の時間的变化である。すなわち、各指標は、

$$Q_t/V_t = (\text{一日の総流出量}/\text{その日の貯水量}) \quad (1-4)$$

$$\beta = (\rho_b - \rho_s) / H \quad (1-5)$$

$$\varepsilon_\delta = (\rho_{1,2} - \rho_{2,3}) / \delta \quad (1-6)$$

$$\varepsilon_L = (\rho_1 - \rho_2) / h_1 \quad (1-7)$$

$$F'_\delta = (L_t Q / H_t V_t) \cdot \sqrt{(\rho_0 / g) / \beta} \quad (1-8)$$

$$F_\delta = (Q / h_1 B) / \sqrt{g \cdot (\Delta \rho_\delta / \rho) \cdot h_1} \quad (1-9)$$

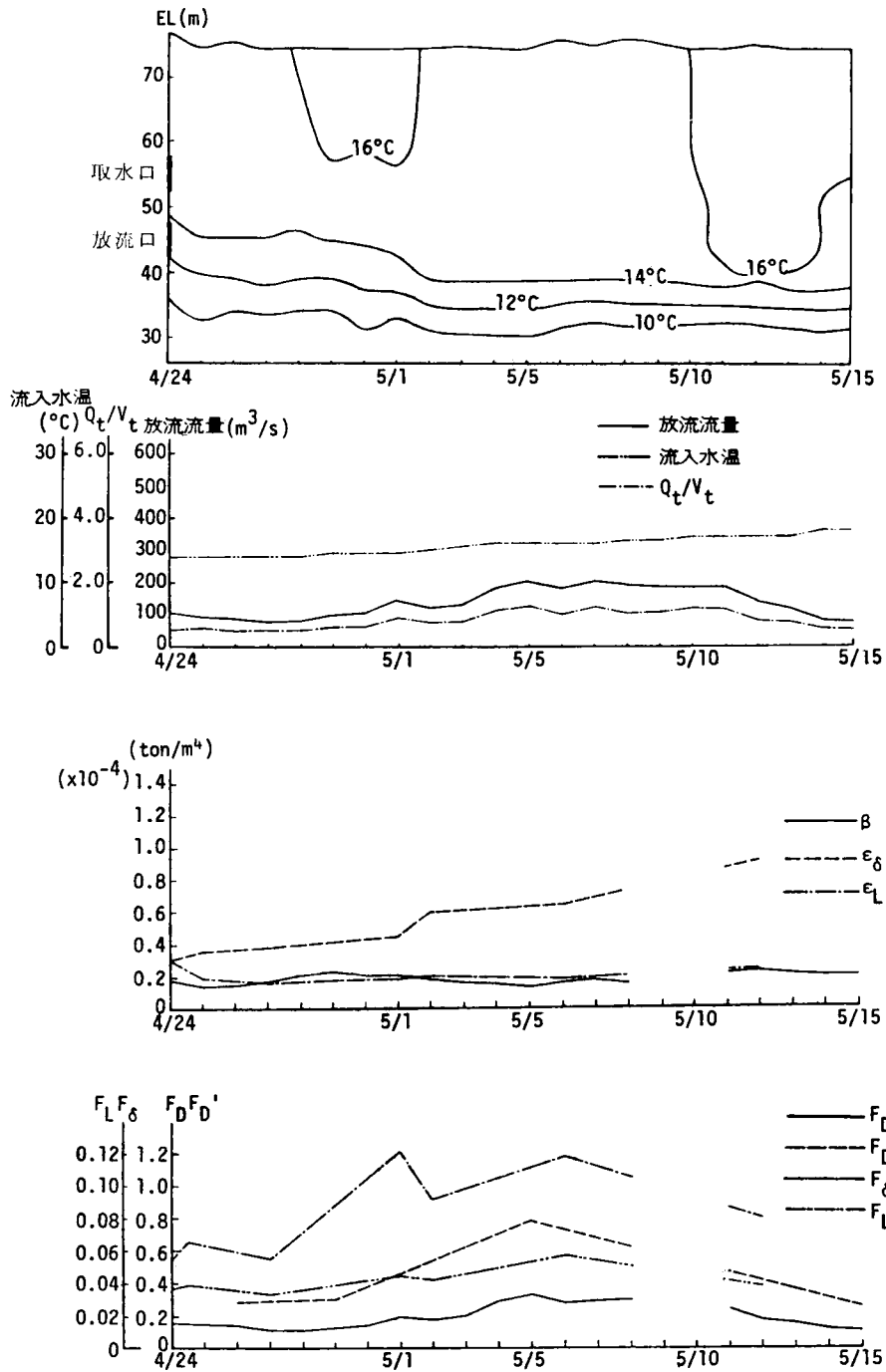
$$F_L = (Q / h_1 B) / \sqrt{g \cdot (\Delta \rho_L / \rho) \cdot \delta} \quad (1-10)$$

である。ここに、 $\beta$ ；貯水池内平均密度勾配、 $\varepsilon_\delta$ ；変温層の密度勾配、 $\varepsilon_L$ ；水温成層を二層流としたときの密度勾配、 $F'_\delta$ 、 $F_\delta$ 、 $F_L$ ；それぞれ $\beta$ 、 $\varepsilon_\delta$ 、 $\varepsilon_L$ に対する内部フルード数、 $\rho_b$ 、 $\rho_s$ ；貯水池底、水表面の密度、 $\rho_{1,2}$ 、 $\rho_{2,3}$ ；変温層上端、下端位置の密度、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ ；上層、下層の平均密度、 $H$ ；水深、 $\delta$ ；変温層の厚さ、 $h_1$ ；上層の厚さ、 $Q$ ；日平均流出流量、 $L_t$ ； $V_t$ に対する貯水池長、 $H_t$ ； $V_t$ に対する平均水深、 $\Delta \rho_\delta$ ；変温層の密度差（ $= \rho_{2,3} - \rho_{1,2}$ ）、 $\Delta \rho_L$ ；二層流の密度差（ $= \rho_2 - \rho_1$ ）である。なお、 $F_\delta$ は(1-2)式の $Q$ に日平均流出流量、 $-d\rho/dz$ に $\beta$ を代入して得られる貯水池内平均内部フルード数である。

各図の等水温線の変化から、5月1日には水温成層の低下が起こり、5月22日、5月30日、9月9日にはそれぞれ水温成層の破壊が生じたことがわかるが、これらの日時は、二次的なものである5月30日の例を除くと、洪水吐からの放流が開始された日から、それぞれ2日後、3日後、1日後のことである。また、このときの諸量の変化より、変形・破壊時には流量が急激に増大し、流入水温が、5月1日、5月30日の例を除いて2～3℃低下したことがわかるとともに、各種の密度勾配の低下とそれらに対する内部フルード数の上昇がみられ、その変化は破壊の場合により急であることがわかる。しかし、変形・破壊の判定基準となるような各種指標の値については明らかでない。

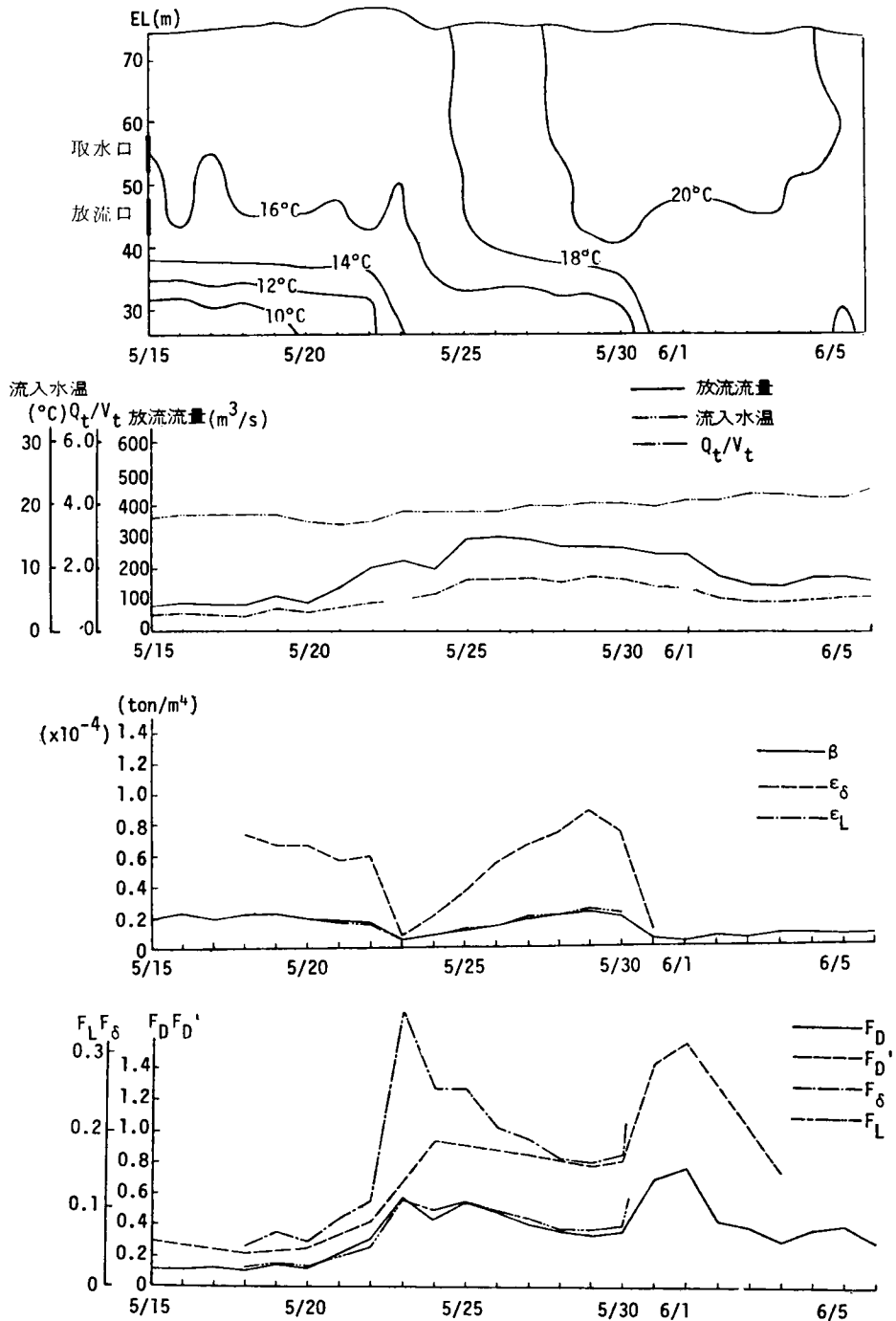
そこで、水温成層の破壊時における諸量の挙動について、より短い時間スケールでみたものが、

天ヶ瀬貯水池一成層低下—  
昭和51年



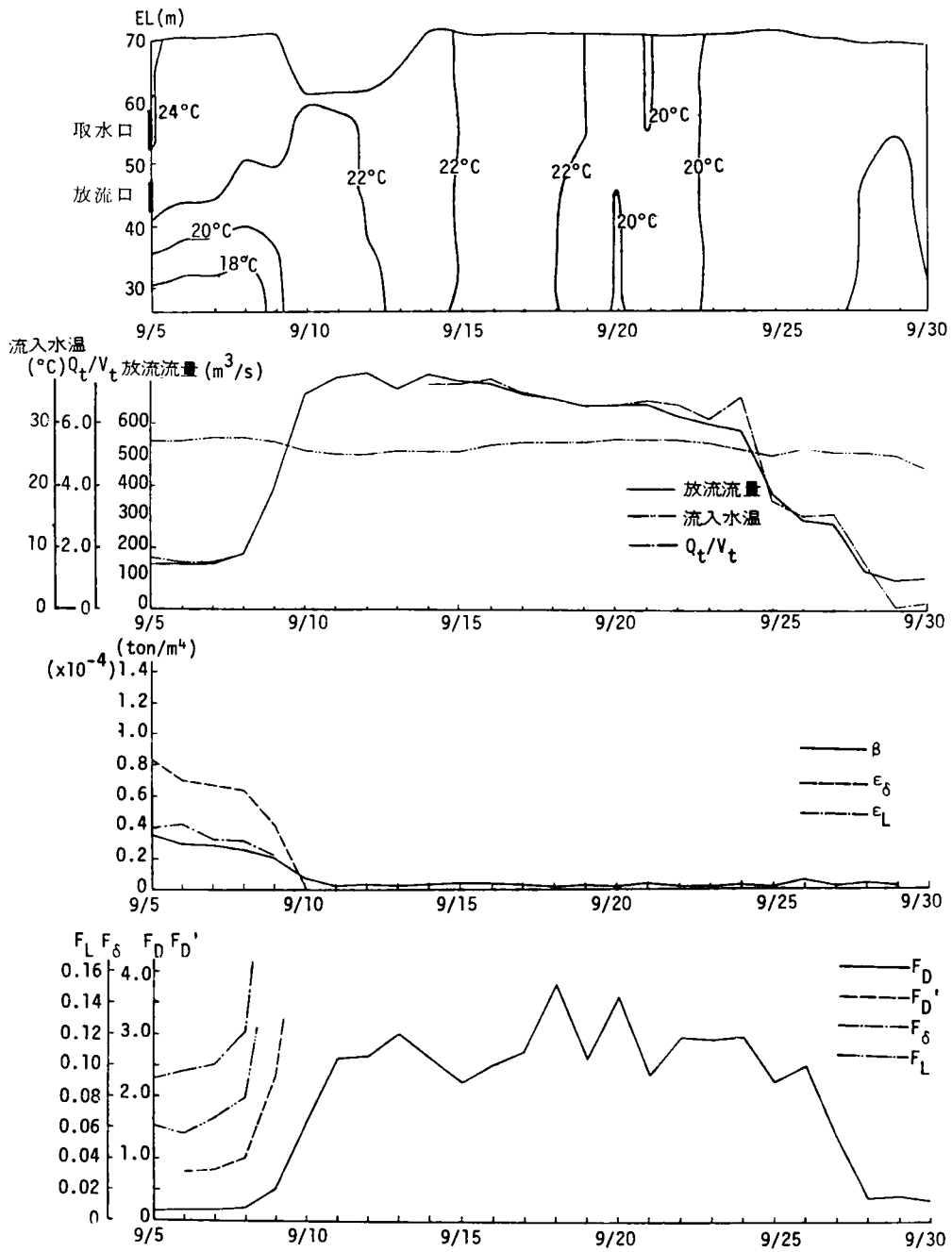
図一—19 天ヶ瀬貯水池における水温成層の変形例 (昭和51年4月24日～5月15日)

天ヶ瀬貯水池—成層破壊—  
昭和51年



図一—20 天ヶ瀬貯水池における水温成層の破壊例 (昭和51年5月15日～6月5日)

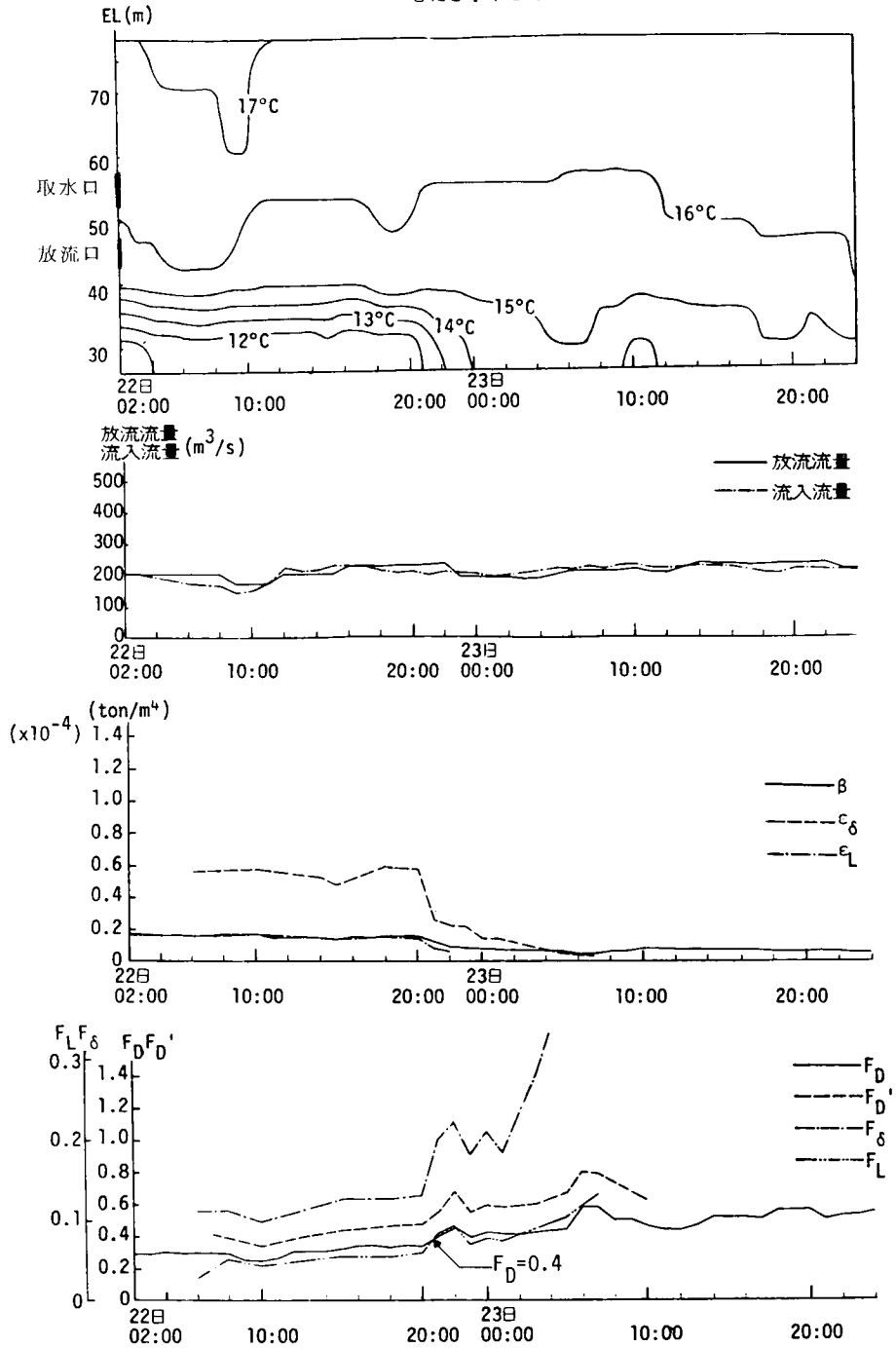
天ヶ瀬貯水池一成層破壊—  
昭和51年



図—1—21 天ヶ瀬貯水池における水温成層の破壊例  
(昭和51年9月5日～9月30日)



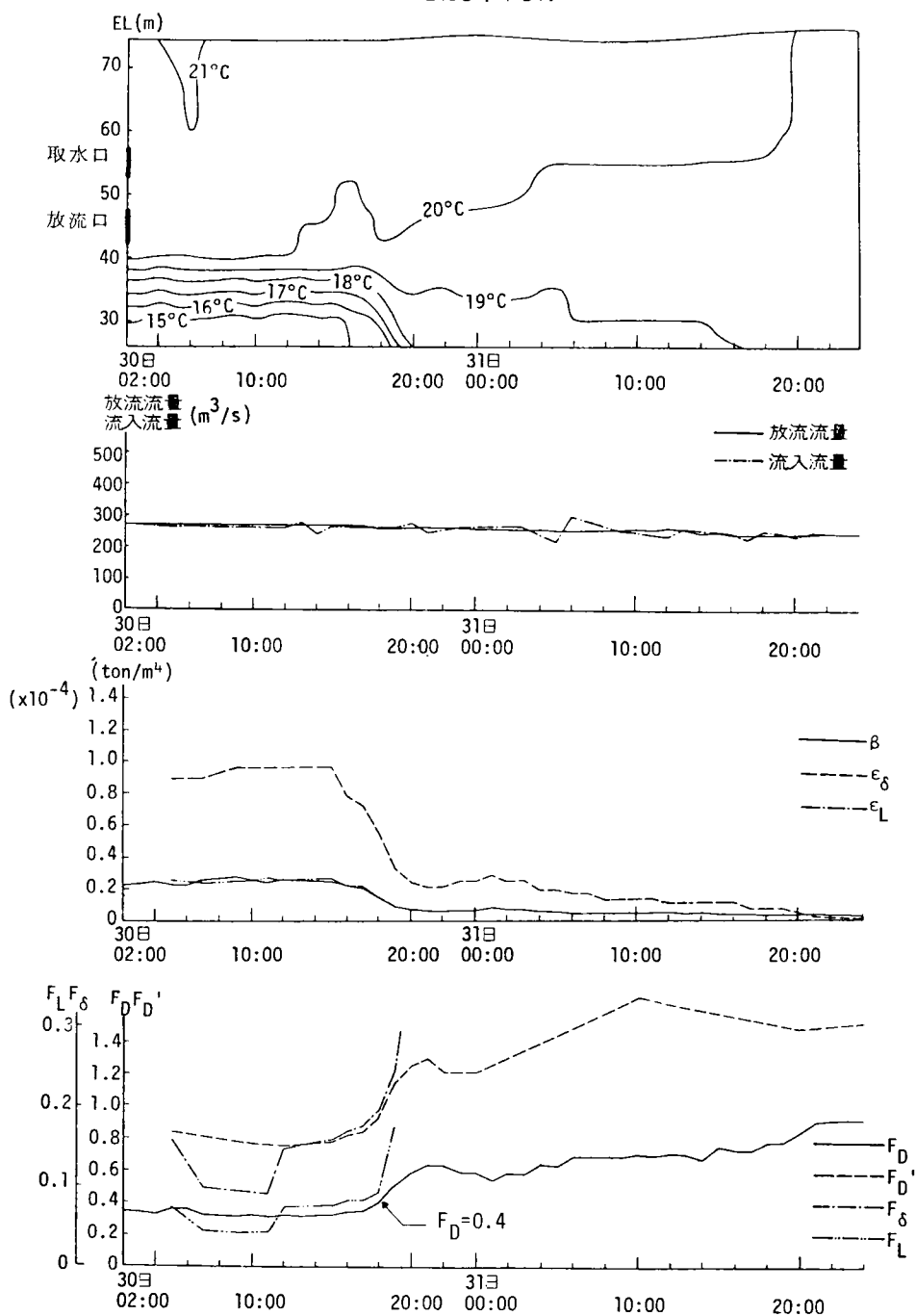
天ヶ瀬貯水池一成層破壊—  
昭和51年5月



図一1—22 天ヶ瀬貯水池における成層破壊時の挙動  
(昭和51年5月22日～5月23日)

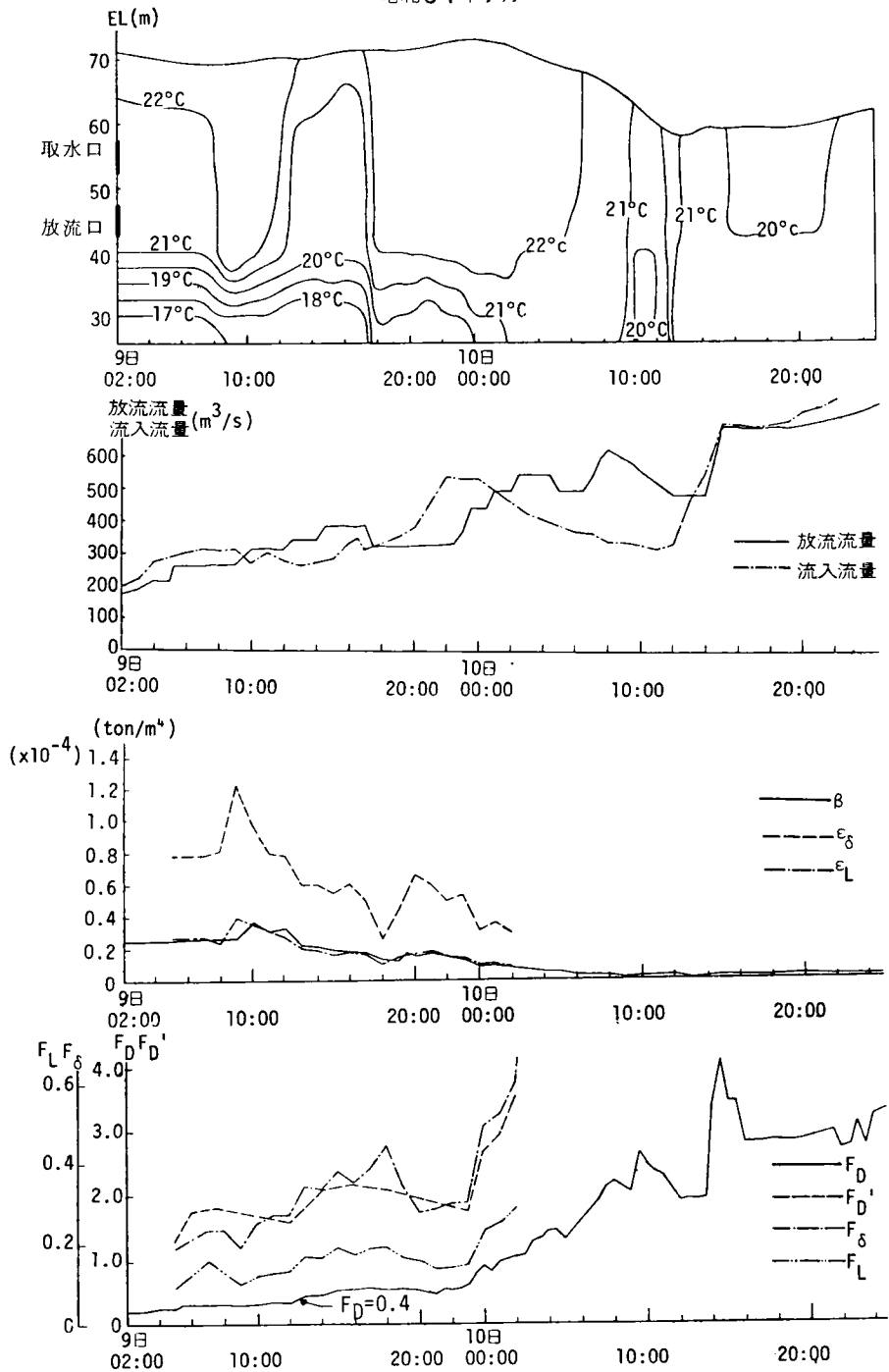
天ヶ瀬貯水池一成層破壊一

昭和51年5月



図一1—23 天ヶ瀬貯水池における成層破壊時の挙動  
(昭和51年5月30日～5月31日)

天ヶ瀬貯水池一成層破壊—  
昭和51年9月



図—1—24 天ヶ瀬貯水池における成層破壊時の挙動（昭和51年9月9日～9月10日）

表一1-3 天ヶ瀬貯水池における成層破壊時の放流量

月.日.時刻	$\Sigma Q_{out}$ ( $\times 10^6 m^3$ )	$\Sigma Q_{out}/V_0$	月.日.時刻	$\Sigma Q_{out}$ ( $\times 10^6 m^3$ )	$\Sigma Q_{out}/V_0$	月.日.時刻	$\Sigma Q_{out}$ ( $\times 10^6 m^3$ )	$\Sigma Q_{out}/V_0$
5.22.12	38.87	1.48	5.30.12	219.80	8.34	9.9.12	28.80	1.10
13	39.60	1.51	13	220.37	8.38	13	30.02	1.14
14	40.32	1.53	14	221.33	8.42	14	31.24	1.19
15	41.05	1.56	15	222.30	8.45	15	32.57	1.24
16	41.87	1.59	16	223.37	8.49	16	34.43	1.31
17	42.69	1.62	17	224.24	8.53	17	36.82	1.40
18	43.50	1.65	18	225.18	8.56	18	39.20	1.49
19	44.32	1.69	19	226.12	8.60	19	41.58	1.58
20	45.14	1.72	20	227.06	8.63	20	43.84	1.67
21	45.98	1.75	21	228.01	8.67	21	46.00	1.75
22	46.82	1.78	22	228.96	8.71	22	48.16	1.83
23	47.51	1.81	23	229.91	8.74	23	50.31	1.91

図-1-22～24である。これらの図をみると、成層破壊はいずれも30分～2時間程度の比較的短時間で起こっていることがわかる。このとき、各密度勾配は当然急低下するが、これだけでは破壊に至る過程が明らかでない。ところが、内部フルード数の値でみると、成層破壊時に  $F_D$  がほぼ0.4を超える時刻があり、この値を超えると短時間のうちに破壊が完了しているようである。しかし、 $F'_D$ 、 $F_\delta$ 、 $F_L$ については、破壊時の値がまちまちで明らかでない。

一方、洪水の流入開始時から成層破壊に至るまでの流出量及びその貯水容量に対する比を示すと、表-1-3のようである。流出量  $\Sigma Q_{out}$  は、15分、30分、60分ごとの流量平均値から求めたものである。この表より、5月22日の破壊に続く二次的なものである5月30日のものを除くと、破壊時刻の  $\Sigma Q_{out}/V_0$  の値は、1.40（9月9日17時）～1.72（5月22日20時）であり、いずれもほぼ同程度の値を示していることがわかる。安芸・白砂<sup>17)</sup>によると、この値が0.5以上になると成層の変形が起こり、1.0以上では成層が破壊されることが多いとされているが、表-1-3は、これをある程度裏付けるものであろう。しかし、成層の変形しか起こらなかった5月1日の例でも、この値が、1.16と1.0を超えており、先に述べた内部フルード数の判定値とともに、なお多くの実測例による検討が必要であらう。

つぎに、こうした成層破壊の挙動を、取水口あるいは洪水放流吐よりの放流に伴う取水層厚の変化による影響の面から検討してみると、表-1-4のようである。同表には、選択取水に関する Craya<sup>18)</sup> ならびに Kao<sup>19)</sup> の式を用いて、各洪水期間中における取水層厚の変化と変温層の低下量を計算した結果が示されている。これから、成層の変形あるいは破壊時には、いずれも取水層厚が急激に増大し、各変化の完了時点での変温層の低下量は、Kaoの式によると、低下時で

表一—4 洪水時における取水層厚の変化に関する計算例

年・月・日	Crayaの式による 取水層厚 (m)	Kaoの式による取水層厚 (m)		Crayaの式による 躍層低下量 (m)	Kaoの式による 躍層低下量 (m)
		洪水吐取水層厚	取水口取水層厚		
51.4.29	22.68	3.87	26.49	0	0
4.30	23.40	8.73	27.35	0.34	2.43
5.1	26.72	12.33	27.15	2.02	4.23
5.2	25.82	17.35	34.23	1.57	6.74
5.3	26.90	20.36	28.85	2.11	8.25
5.4	30.90	31.28	29.47	4.11	13.70
51.5.19	23.86	14.12	25.72	0	0
5.20	22.18	0.83	26.81	—	0.50
5.21	27.20	23.12	27.55	1.67	4.50
5.22	31.78	38.23	28.75	3.96	12.16
5.23	42.90	44.91	40.60	9.52	15.40
5.24	37.26	23.04	45.56	6.70	9.92
5.25	39.58	37.30	44.81	7.86	11.60
5.26	37.83	35.77	41.62	6.99	10.80
5.27	35.50	32.10	38.81	5.82	9.00
5.28	34.62	27.60	38.08	5.38	6.70
5.29	32.78	26.96	36.95	4.46	6.40
5.30	32.82	27.43	38.35	4.21	6.70
5.31	45.48	35.38	54.91	10.81	14.60
51.9.7	25.38	—	31.15	0	0
9.8	27.60	9.80	33.89	1.10	1.40
9.9	40.48	45.61	36.33	7.55	17.90
9.10	69.44	104.65	—	22.03	47.40

約4.2 m (5月1日), 破壊時で12.1 m (5月22日)~17.9 m (9月9日)に達していることがわかる。これらの結果は, 実際の変温層の挙動とある程度対応しており, 従来の選択取水式のある程度の妥当性と取(放)水による成層変化への影響を少なからず示すものと考えられる。こうした取水の影響は芦田・江頭<sup>20)</sup>によっても理論的・実験的に考察されているが, 定性的にはほぼ同様な結果が得られているようである。

#### 1.4. 濁度分布特性と濁水長期化現象

洪水時に貯水池へ流入する濁水の挙動は, 水温のそれとは異なり, 時間的にも空間的にもより急激な変化を示すことが多い。すなわち, 貯水池へ流入した微細な懸濁物質は, しばしば濁水塊を形成して貯水池内を流下し, 貯留されることがある。一方, こうした濁水の流下及び貯留過程は, 貯留水の密度分布すなわち水温成層の挙動や流入洪水の規模, さらに流出量を支配する貯水池操作条件などと密接に関連している。

たとえば、図-1-25は、長安口貯水池での昭和52年4月～昭和53年5月の期間における水表面濁度の時間的変化を、計測スケールの異なる2つの資料を用いて示したものであり、また図-1-26～29は、同期間における洪水後の水温、濁度分布例であるが、これらの観測例を用いて、貯水池における濁度変化の時間的・空間的特性を考察してみると、次のようであろう<sup>21), 22)</sup>。

- 1) 洪水時及びその直後の期間における濁度は、1日あるいはそれ以下のスケールで急激に変化する。
- 2) 洪水後の貯留過程及びそれに続く低減過程では1日以下の短いスケールの変動は小さく、数日～10日程度の間隔で測れば十分把握しうるような変化である。とくに、水温成層が破壊され貯水池全体が濁水化した昭和52年9月半ば以降ではその傾向が顕著である。
- 3) 成層期に小規模洪水が流入した後の例である図-1-26では、水温成層がその影響を余り受けなかったために、濁水は取水口よりやや深い位置にある変温層より上層に流入し、その後変温層付近に貯留されて高濁度層を形成するが、深水層での濁度の増加は余りみられない。このときの濁度の低減は比較的速やかである。
- 4) 図-1-27は、中規模洪水の流入により水温成層が変形を受けた後の例であるが、この場合の濁度分布も3)とはほぼ同様の傾向を示す。
- 5) 大規模洪水の流入により水温成層が破壊された後の図-1-28の例では、貯水池全体が濁水化し、濁度分布は元の変温層のあたりから水深方向に濁度が急増する形となり、その低減は比較的遅い。
- 6) 成層破壊後の一様水温の期間における図-1-29の例では、5)と同様の傾向があるが、

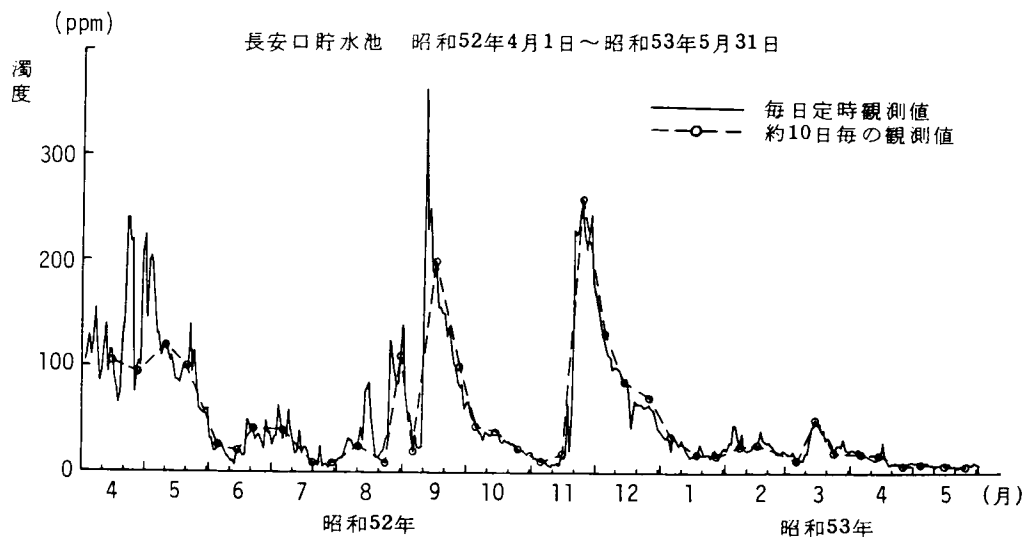
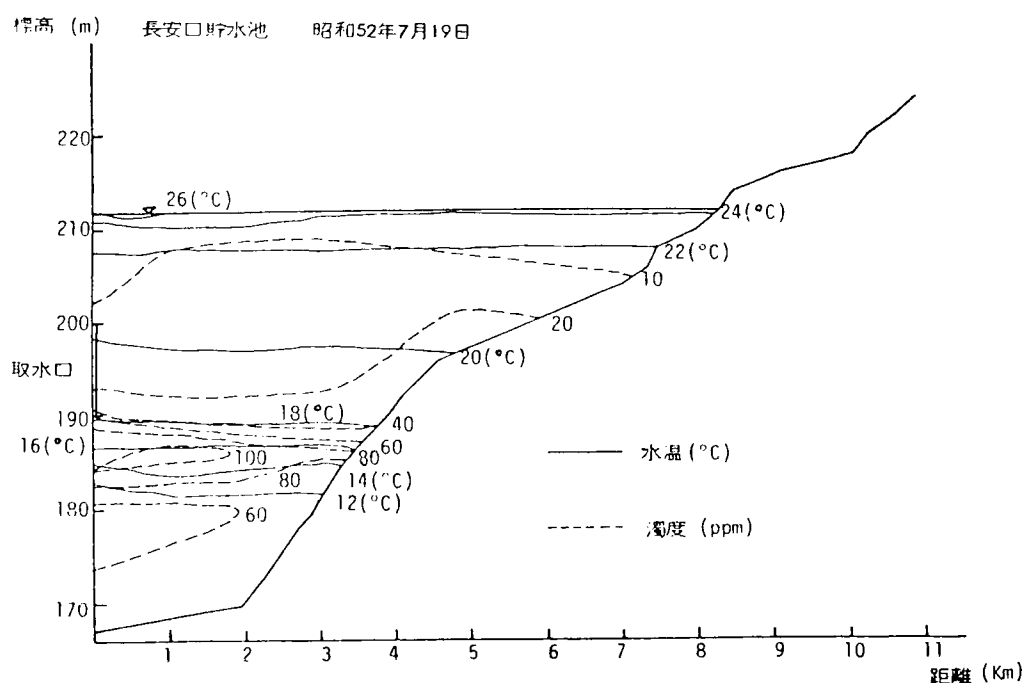
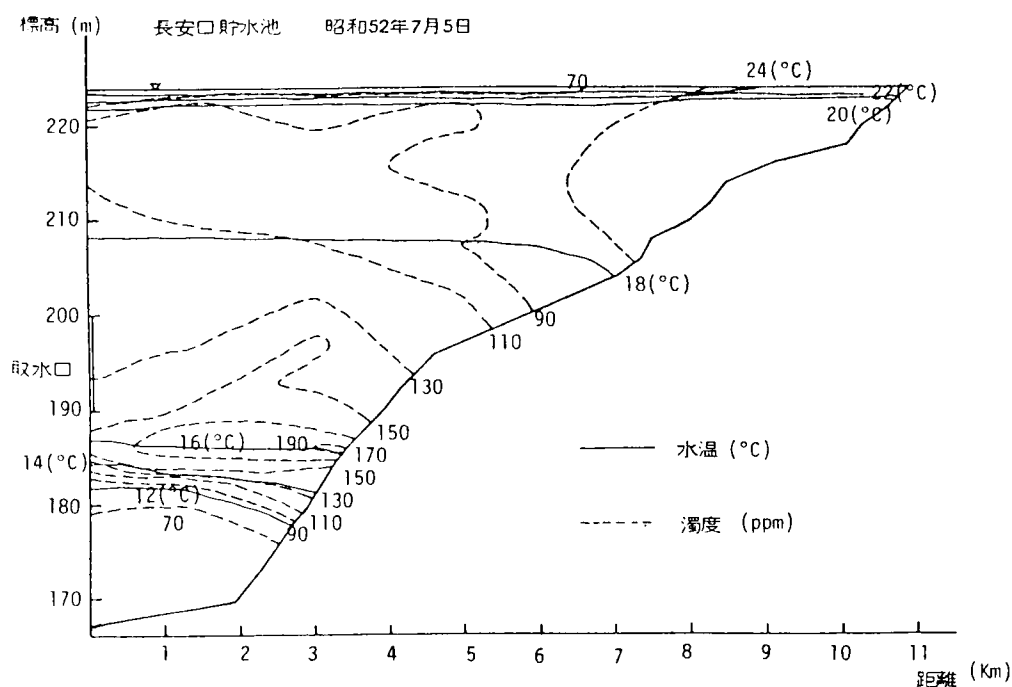
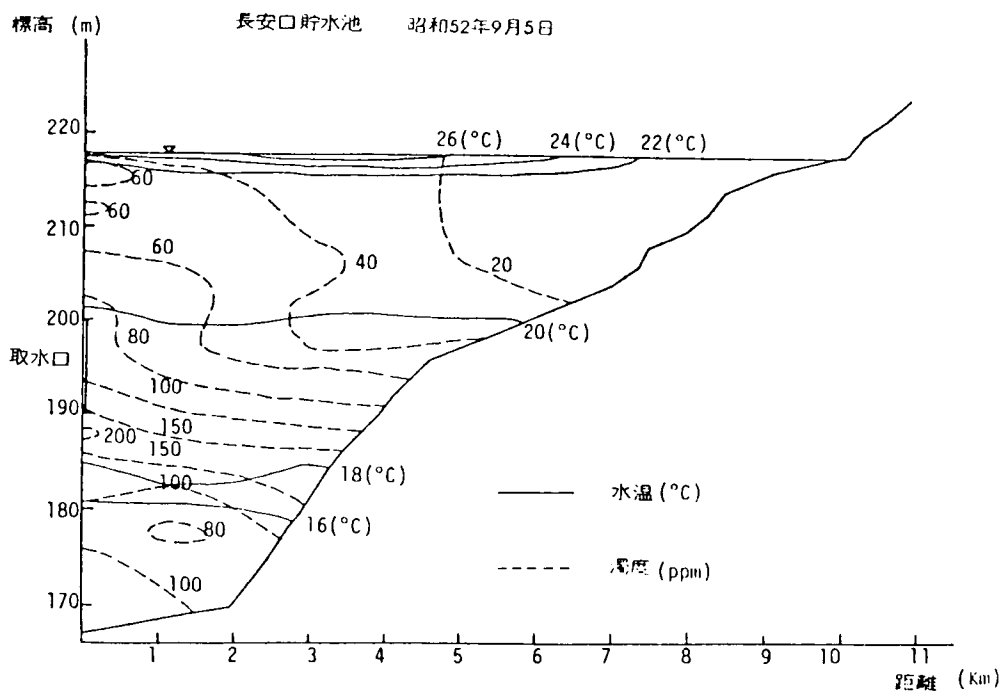
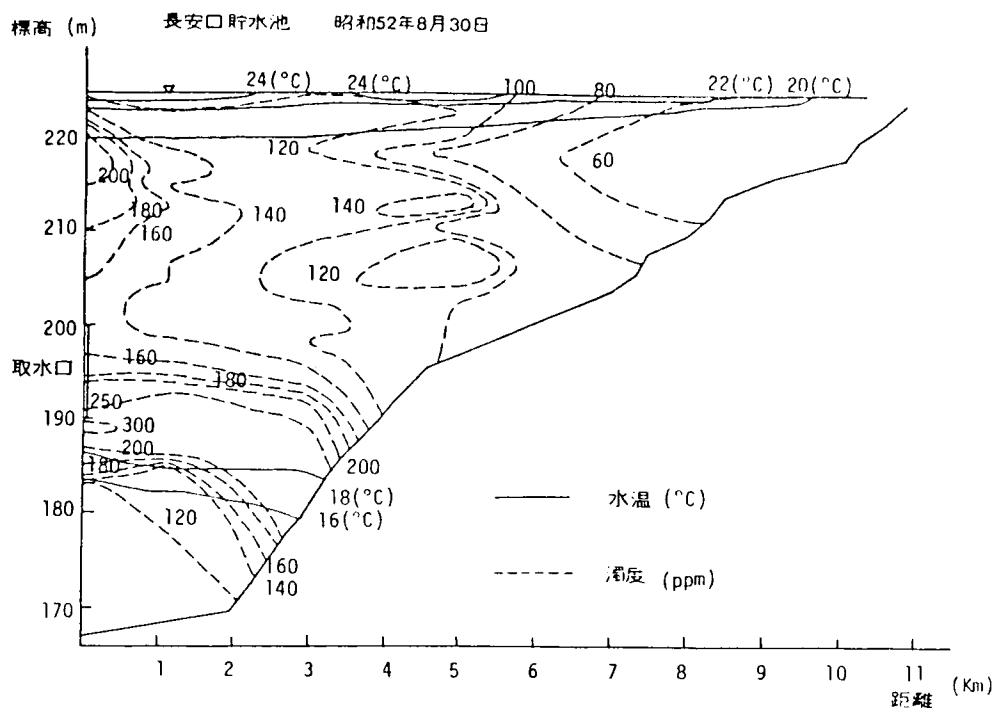


図-1-25 長安口貯水池における水表面濁度の時間的変化

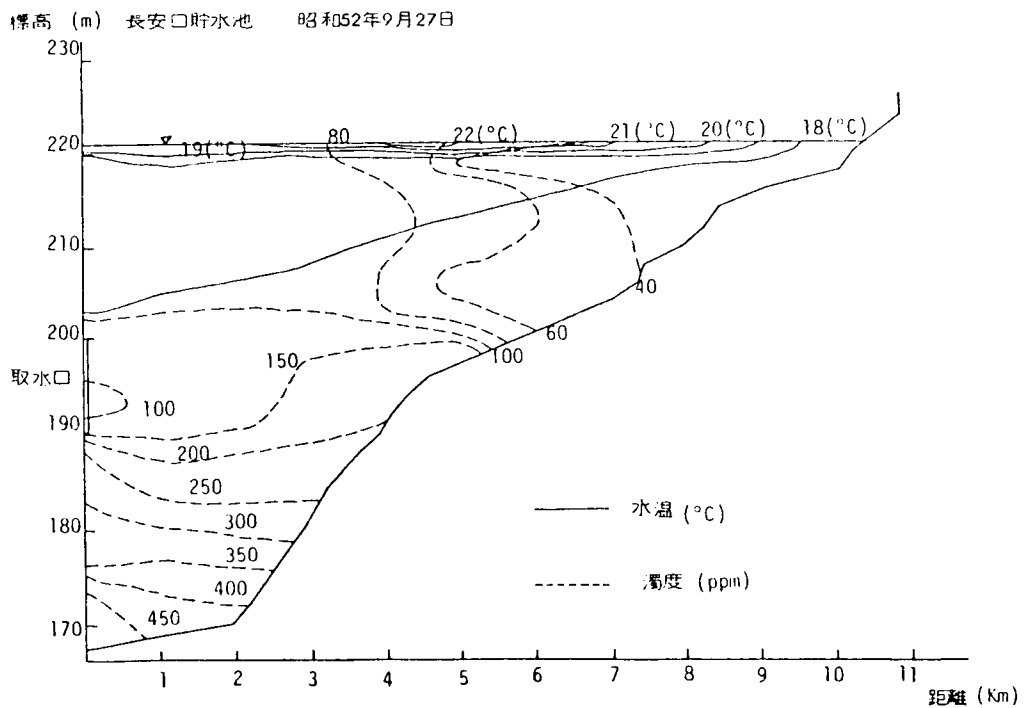
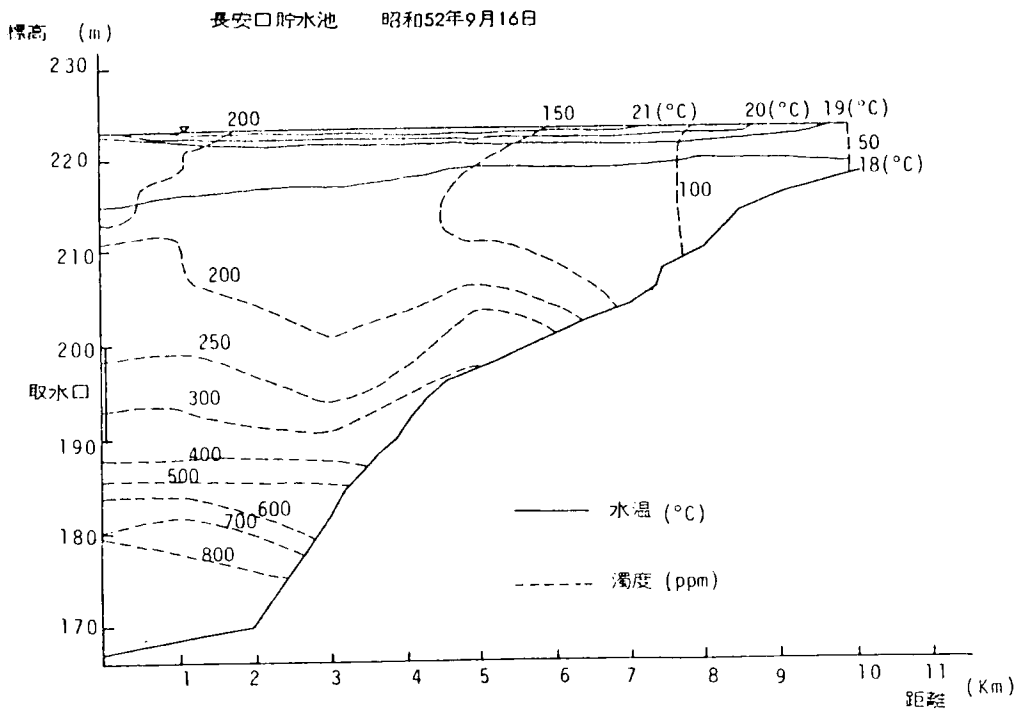


図一1-26 長安口貯水池における洪水後の水温・濁度分布 (小規模洪水の例)

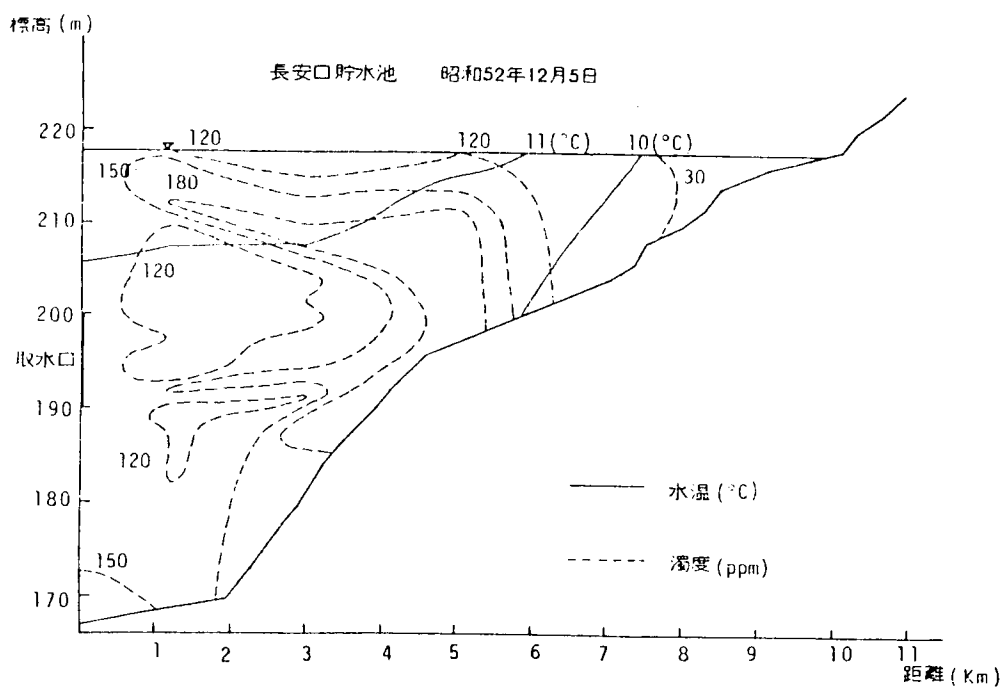
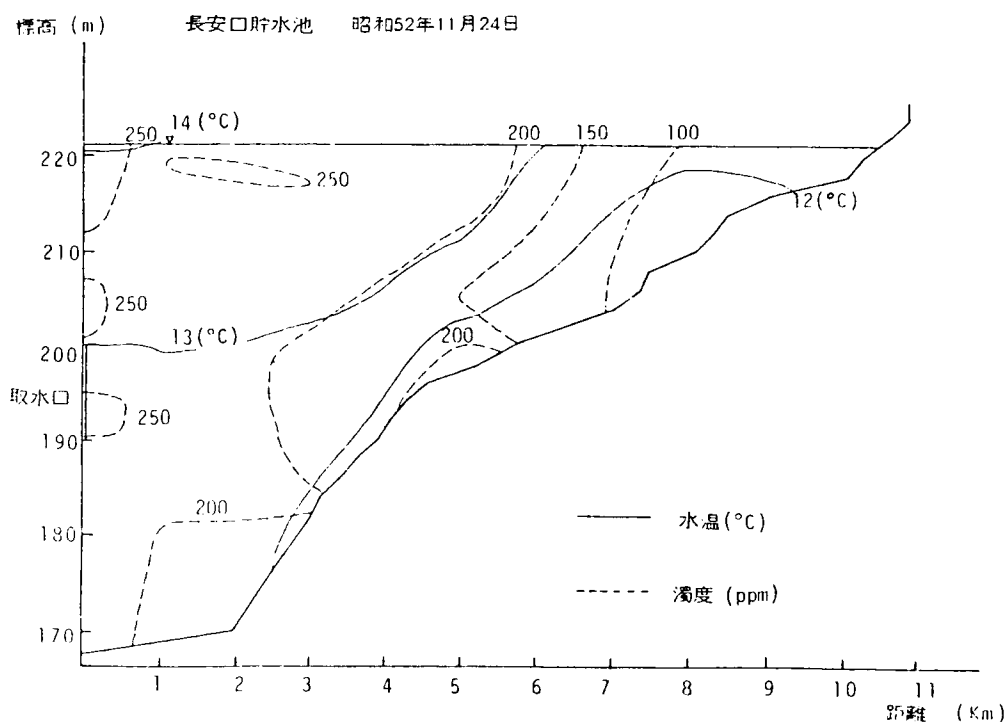


図一—27 長安口貯水池における洪水後の水温・濁度分布 (中規模洪水の例)





図一1-28 長安口貯水池における洪水後の水温・濁度分布 (大規模洪水の例)



図一1-29 長安口貯水池における洪水後の水温・濁度分布 (冷却期の例)

対流混合による影響のため濁度はより一様化している。

7) いずれの場合も、濁度は水温と異なり流れ方向にも変化が顕著であり、種々のスケールの濁水塊を形成することがある。

1)～7)に述べた傾向は、他の成層型貯水池における調査でもほぼ同様にみられるものであり<sup>23), 24)</sup>、成層型貯水池における濁水現象の一般的な特徴と考えてよいであろう。

また、これらの例のうち、濁水長期化として問題となることが多いのは、図-1-28, 29のような場合であり、濁度の希釈・低減がなかなか進まず池水全体が交換されるまで高濃度の濁水が継続するのがふつうである。

なお、混合型の貯水池における濁度の挙動は、5), 6)に述べたと同様の傾向を示し、その時間的・空間的特性についてはそれらの場合に準じて考えておけばよい。

### 1.5. 富栄養化と関係する各種水質濃度の分布特性

貯水池は一つの閉鎖水域を形成するため、天然湖沼同様、流入する窒素・リン等の栄養塩類など、生物活動に関係の深い水質物質を貯留し蓄積する。こうした性格は、貯水池内に生息する様々な種類の生物により構成される生態系にも大きな影響を及ぼす。これらの変化や影響は、貯水池における富栄養化現象として顕在化し、それに伴う有機汚濁が問題化するところまででてきた。

富栄養化に関係する水質物質の変化は、水温、濁度と異なり生物学的・化学的变化を伴うことが特徴である。しかし、生物活動に起因する変化も、流れの運動学的挙動及び水温・濁度分布など、物理要素と深く関係している。このため、これらの物理要素が各種の環境境界条件に応じて多様かつ複雑な挙動を示す貯水池においては、補償水深（有光層の水深で天然湖沼においては水温成層の水深と一義的な関係があるとされている<sup>25)</sup>）により生物活動の場が一義的に決定される天然湖沼と異なり、各種水質要素の変化はより複雑である。

こうした貯水池における富栄養化現象についての調査研究は、従来、生態学あるいは水質工学の立場から進められてきており<sup>26), 27)</sup>、定性的にはその実態と特徴が徐々に明らかにされつつある。これらの調査研究によると、植物プランクトンや栄養塩等の生物学的・化学的水質要素の濃度は、水温及び日射量等の年変化に応じて巨視的には一年周期の季節的变化を繰返すとされている<sup>26)</sup>。具体的には、水温成層の形成が始まる春季から、それが消滅する秋季にかけて、2～3回の植物プランクトンの生長期があり、各水質値はそれに対応した増減を繰り返すが、冬季には、水温の低下とともに植物プランクトンは消滅するといわれている。しかし、洪水の流入など流出入条件の変化による生物活動への影響や、植物プランクトンの急激な増殖による水の華の出現など、短期的な変化については、資料の不備などもあってまだ十分に明らかにされていないのが現状である。一方、各水質要素の空間的分布については、水深方向の分布特性と水温成層の位置及

び補償水深との関連が定性的に考察されてはいるが、流れ方向の変化など流れの挙動に基いた動的な把握は十分ではない。

以上が、貯水池の富栄養化に関する実態把握の現状であるが、ここでは、室生貯水池における観測例からこれに關係する水質の空間的分布特性を考察してみよう。

図-1-30は、室生貯水池における夏季の水溫成層ならびに冬季の一樣水溫分布の例であるが、このときのクロロフィルa及び硝酸性窒素の濃度分布を示すと図-1-31, 32のようである。ここで、クロロフィルaは植物プランクトンの平均量を示す指標であり、従来よりよく用いられるものである。これらの図では、成層期において、クロロフィルa濃度が変温層より上の表水層で高濃度となり、逆に硝酸性窒素は表水層で低く深水層で高い値を示しているのがみられ、表水層において植物プランクトンによる一次生産（光合成）が活発で、窒素・リン等の栄養塩が摂取

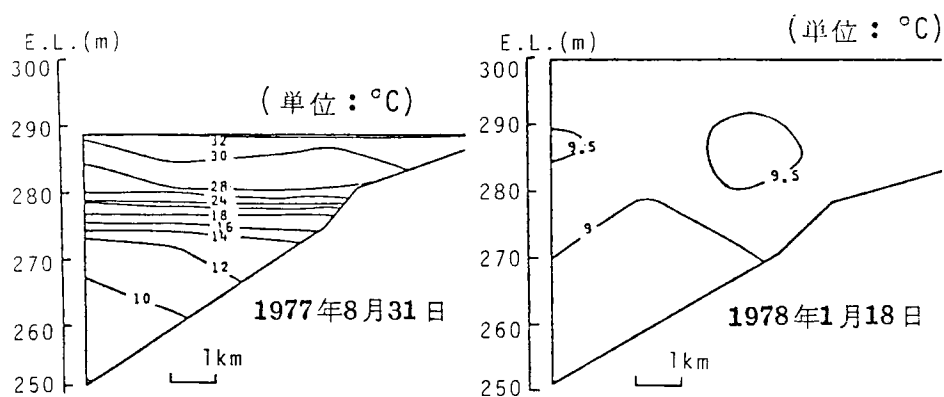


図-1-30 室生貯水池における夏季及び冬季の水溫分布例

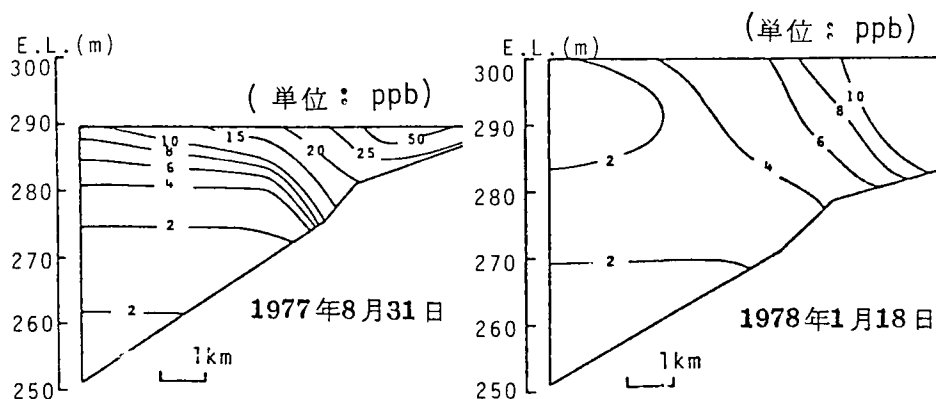
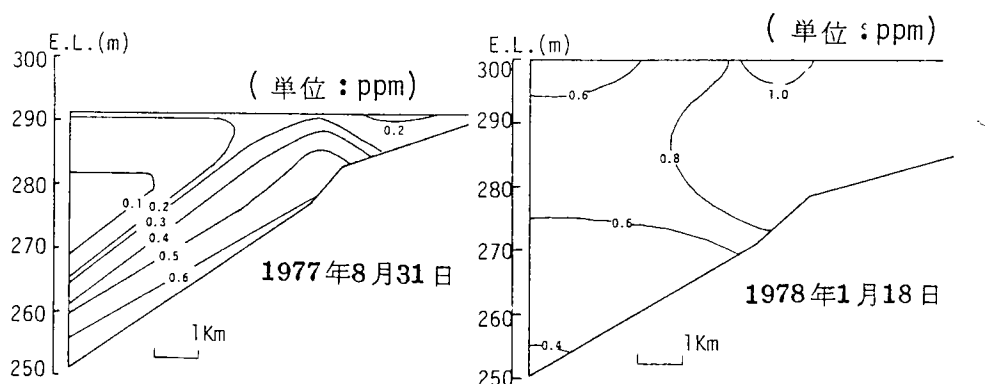


図-1-31 室生貯水池における夏季及び冬季のクロロフィルa濃度の分布例



図一1—32 室生貯水池における夏季及び冬季の硝酸性窒素濃度の分布例

されていることを示している。また、このときの流れ方向の水質変化は、クロロフィル a、硝酸性窒素ともに流入端付近で濃度が高く流下に伴ない減少するような分布となっている。これは、貯水池へ流入する付着藻類及び栄養塩の影響にもよるが、クロロフィル a の場合には、この地点で植物プランクトンの増殖が著しいことを反映したものと考えられる。こうした傾向は従来の観測例でもしばしば指摘されており<sup>27)</sup>、この領域が、流入による栄養塩の供給に加え、高温かつ一様な水温を有することによって生物活動に好都合な条件を与えていることが考えられる。一方、冬季の一樣水温のもとでの各水質分布は水温同様ほぼ一様で、上述したような生物活動による影響はほとんどみられず、むしろ各水質物質の流下に伴う変化が卓越する傾向にある。なお、ここでは示さなかったが、無機態リンは硝酸性窒素と、また有機態の窒素、リンはクロロフィル a とほぼ定性的には同様の分布傾向をもつことがわかっている<sup>28)</sup>。

このように、生物活動による変化を伴う水質物質の分布特性は、生物活動に関係する諸条件の変化によって季節的に異なるが、水理学的な立場からみると、これらの水質も、濁度と同様に水深方向ばかりでなく流れ方向にも変化する濃度として取り扱うことができる。

貯水池における富栄養化の調査は、先にも述べたようにまだまだ不十分であり、各種の水質要素の時間的・空間的变化特性とそのスケールをより明らかにするための調査研究が、さらに今後とも必要であろう。

## 参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗；開水路流れのモデリング法；1980年度水工学に関する夏期研修会講義集，土木学会水理委員会，80-A-3，1980年。
- 2) 新井正・西沢利栄；水温論，共立出版，1974。
- 3) 岩佐義朗・綾史郎・松尾直規；那賀川における濁質流出の特性，第16回自然災害科学総合シ

- ンホジウム講演論文集, 1979, pp. 203～204.
- 4) 岩佐義朗・野口正人・児島章; 貯水池内の水温成層予測法について, 京都大学防災研究所年報第18号-B, 1975, pp. 565～574.
  - 5) 岩佐義朗; ダム貯水池における水理特性; 建設省河川局編日本河川水質年鑑, 研究編, 山海堂, 1977年, pp. 797～815.
  - 6) 安芸周一・白砂孝夫; 貯水池濁水現象の調査と解析(その1), 電力中央研究所報告74505, 1974.
  - 7) Water Resource Engineers, Inc. Walnut Creek, California; Mathematical Model for the Prediction of Thermal Energy Changes in Impoundments, 1969.
  - 8) 前出の4).
  - 9) 日本水産資源保護協会; 徳島県那賀川河口養殖ヒトエグサ等被害原因調査報告書, 1977年, pp. 159～251.
  - 10) 建設省四国地方建設局大渡ダム工事事務所, 国土開発技術研究センター; ダム放流設備設計資料調査報告書, 1977.
  - 11) 建設省四国地方建設局大渡ダム工事事務所, 国土開発技術研究センター; ダム放流設備設計資料調査報告書, 1978.
  - 12) 小林正典・岩佐義朗・松尾直規; わが国多目的貯水池の水理・水文的特徴とその評価, 第24回水理講演会論文集, 1980年, pp. 245～250.
  - 13) 前出の11).
  - 14) 前出の6).
  - 15) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭; 洪水時における貯水池の成層破壊について, 京都大学防災研究所年報第20号-B, 1977, pp. 259～270.
  - 16) 嶋祐之; 成層密度流の界面現象に関する水工学的研究, 文部省科学研究費試験研究(1)最終報告書, 1974, pp. 1～11.
  - 17) 前出の4).
  - 18) Craya, A; Theoretical reserch on the flow of non-homogeneous fluids, Laitouille Blanche, Jan-Feb, 1949
  - 19) Kao, T.W.; A Free-streamline solution for stratified flow into a line sink, Jour. of Fluid Mechanics, Vol.21, Part 3, 1965, pp.815～822.
  - 20) Ashida, K. and S. Egashira; Hydraulic characteristics of thermocline in reservoirs, 17th Congress of IAHR, Vol.2, 1977, pp.33～40.
  - 21) 徳島県, 防災研究協会; 昭和53年度那賀川濁度追跡調査報告書, 1979.
  - 22) 松尾直規・岩佐義朗・小林正典・川那部嘉彦; 貯水池水理の空間的スケールからみた解析法の考察, 第25回水理講演会論文集, 1981.

- 23) 安芸周一；貯水池濁水現象，1975年度水工学に関する夏期講義集，75-A-1，1975.
- 24) 岩佐義朗・松尾直規・井上素行；貯水池における濁度解析について，京都大学防災研究所年報第21号-B，1978，pp.319～329.
- 25) 建設省関東地建川治ダム工事事務所，国土開発技術研究センター；ダム貯水池富栄養化調査報告書，1981.
- 26) 津田松苗；陸水生態学，共立出版，1974，pp.137～158.
- 27) 合田健・海老瀬潜一；ダム貯水池の富栄養化とシミュレーション，土木学会論文報告集第263号，1977，pp.49～61.
- 28) 建設省近畿地建木津川上流工事事務所；室生ダム湖水質汚濁調査報告書，1978.

## 第2章 貯水池水理の解析のための数学モデル<sup>1)~5)</sup>

### 2.1. 概 説

貯水池水理で対象とする冷水、濁水長期化、富栄養化の各課題に関係する水理要素の挙動とその特徴は、流れの場のスケールを支配する貯水池の規模及び幾何形状と、運動量、熱量及び物質量の流出入を支配する種々の環境境界条件の影響を反映したものである。したがって、貯水池水理の解析には、これらの諸条件が、現実の各種変化に対してどのような影響を及ぼすかをできるだけ忠実に明らかにしうる方法を用いなければならない。電子計算機の発達した今日では、こうした実際現象を対象とする解析は、現象を記述する数学モデルを現実の諸条件のもとで数値的に解くいわゆる数値解析（数値シミュレーション）法によるのが最も効果的であり、事実、一般によく用いられている<sup>6)</sup>。

貯水池水理に関するこのような数学モデルの開発とそれを用いた実際現象の解析は、従来より鋭意進められてきており、解析目的、対象とする現象のスケール、対象貯水池の性格、さらに各研究者による現象の認識ならびに表現法の違いにより、種々のモデルが提案され、そのうちのいくつかのものは、すでに実用化の段階に達している。そこで、まず、これら従来の数学モデルを整理し、その特徴と問題点を概括しておくことにする。

従来の数学モデルは、その数学的表現からいくつかのものに分類されるが、モデル構造の面からみると、入力－出力モデルと擬似構造モデルの2つ<sup>7)</sup>に大別される。入力－出力モデルは貯水池を一つのブラック・ボックスあるいは完全混合槽とみなし、流出入水温・濁度等の応答関係を表現したものであり、擬似構造モデルは、種々の環境境界条件に対応した貯水池内での流れの運動学的挙動、及び水温・濁度分布等の力学的挙動を、近似的に表現したものである。両者の間には変換関係があることが知られているが、貯水池水理に関しては、初期の入力－出力モデルから、現在では擬似構造モデルに研究の焦点が移っている状況であろう。

一方、現象を決定論的立場から取り扱うか、または確率統計論的立場から取り扱うかによっても数学モデルは分類される。しかし、貯水池水理では、流体力学原理を出発点とした決定論的立場より水理現象を数学モデルに表現するのがふつうであり、カルマン・フィルター理論等を用いた後者のものは、余り一般的ではない。

決定論的立場からのものは、方法論としてシステム解析法（Lagrange的立場）を用いるか、コントロール・ボリューム法（Euler的立場）をとるかによって、構造的には先に述べた2つのものに分かれる。このうち、コントロール・ボリューム法によるものは、対象とする現象の空間的一様性に基いて流れの場をいかに取り扱うか、すなわちコントロール・ボリュームの大きさとそれに基く貯水池分割法によって、水平層に分割したもの、さらにそれを流れ方向にも区切った



表－２－１ 貯水池水理に関する従来の数学モデル

モデル構造	方法論	モデル構成	貯水池分割	主な研究者	解析対象	備考
入力－出力 モデル	決定論的方法 (システム) 解析法	水の連続式 水温収支式 濃度収支式	1ボックス	Burt <sup>8)</sup> Raphael <sup>9)</sup> 村本・道上 <sup>10)</sup> 岸 <sup>11)</sup>	流出入水温 および濁度 の関係	
	確率統計論的 方法	入出力に関 する確率論 的な関係式	1ボックス	Song <sup>12)</sup> 渡辺・大野 <sup>13)</sup>	流出入水温 の関係	カルマン・ フィルター 等の導入
擬似構造 モデル	決定論的方法 (コントロール・) ボリューム法	水の連続式 水温収支式 濃度収支式	水平2層 あるいは 水平3層	合田・海老瀬 <sup>14)</sup> 芦田・江頭 <sup>15)</sup>	濁度あるい は溶解性物 質の分布	
			水平多層	Huber・Harleman・ Ryan <sup>16)</sup> Orlob・Selna <sup>17)</sup> Park・Schmidt <sup>18)</sup> 安芸・白砂 <sup>19)</sup>	水温分布 (水温成層)	各種の選択 取水式を用 いて流れの 運動を仮定
			水平方向、 流れ方向へ の分割	W.R.E. <sup>20)</sup> 白砂・宮永 <sup>21)</sup> 岩佐・野口 <sup>22)</sup>	水温および 濁度分布	

ものに分類される。また流体運動や水温・水質の変化機構の取扱いなど、モデルの単純化に伴なう数学的挙動の違いによって、より細分することもできよう。

これまでに述べたことを、一覧表で示すと、表－２－１のようになるであろう。表には、各モデルに関する主な研究者も同時に示している。この表に挙げた各種のモデルは、解析目的とする現象や、対象とする貯水池及び期間がそれぞれ異なるため、その適用性を一概に論ずることはできないが、貯水池内での水理要素の分布とその力学的変化機構が問題とされる現実では、入力－出力モデルの適用の場はかなり限られているといっても過言ではない。したがって、実際にはコントロール・ボリューム法による数学モデルを用いることがふつうであり、また、それを用いなければ、現実の問題を明らかにすることができない。

しかし、この種のモデルについても、従来は流体運動の記述に運動量保存則を用いることなく、代わりに選択取水等に関する諸式を種々の仮定のもとで用いるなど、現実の流れの挙動を忠実に表現し得ない面があるとともに、貯水池分割が現象の空間的スケールと一致せず、所要の再現精度が期待できないこともあった。また、富栄養化に関するモデルでは、各種水質濃度の変化とそれに寄与する流れの運動及び水温の挙動を連立して取り扱ったものは少なく、貯水池における複雑な富栄養化過程を十分に明らかにすることができなかった。

本章では、こうした貯水池水理に関する従来の数学モデルの問題点を認識し、それらの解消を図ることによって、貯水池における各種水理要素の挙動をより明らかにするための数学モデルの

開発について述べる。

まず、表-2-1に挙げたコントロール・ボリューム法によるいくつかのモデルをより詳細に調べ、それらの特徴と問題点を明らかにして、本章で説明する数学モデルの意義を明確にする。つぎに、貯水池水理の基礎となる流体力学原理と、それを適用した数学モデルのモデリング過程を、貯留水の性質、流れの運動学的挙動及び流れの場の3側面より説明し、得られた結果、すなわち水理解析のための数学モデルを記述する。得られたモデルは、貯水池を水深方向及び流れ方向に分割した体積要素について展開したものであるとともに、従来無視されてきた運動量保存則を用いて貯留水の運動学的挙動を表現している点に特徴がある。最後に、富栄養化解析のための水質指標及びそれらの生物学的・化学的变化の数学的表現について、従来の富栄養化モデルを概括しながら検討し、富栄養化に関係する各種水質濃度の収支則を導く。

## 2.2. 従来の各種予測モデル

貯水池内における水理要素の挙動を解析・予測するための数学モデルは、貯留水の高度利用に最も関係が深く、事実冷水問題に関連した水温成層の解析法として発展してきたといってもよい。水温成層は1.3.1.で述べたように一般に水平であり、水深方向にのみ温度が変化することから、その解析では、貯水池幅方向、流下方向の変化を無視して水深方向にのみ変化を取り扱ったモデルがよく用いられている。また、対象とする貯水池の定性的性格によって、より単純化されたモデルが用いられることも少なくない。

たとえば、Dake-Harleman<sup>23)</sup>は、移流・乱流拡散による熱移動は無視しうるとして、分子拡散項と気象要因による熱生成項のみから成る水温モデルとその解析法を提案し、その結果を、比較的水深が深く平均年回転率 $\alpha$ の極めて小さな成層Ⅰ型貯水池や天然湖沼に応用した。ところが、わが国の貯水池のように平均年回転率が数回～数十回（大きいところでは百数十回に及ぶ）程度であるところでは、このモデルによる現象の再現性は期待できない。一方、平均年回転率が極めて大きい河川型貯水池では、移流が支配的で他の要因は無視しうると考えられることから、岩佐・井上・野口<sup>24)</sup>は、水平層をコントロール・ボリュームとみなして、水の連続式と移流項のみから成る水温収支式で数学モデルを作成し、典型的な成層Ⅱ型貯水池である天ヶ瀬貯水池に適用して比較的良好な結果を得た。しかし、このモデルが適用されうる貯水池は限られており、また、Crayaの式<sup>25)</sup>を用いて流体運動の解とした点など、その汎用性については疑問の点が少なくない。

特定の貯水池を対象としたこれらの単純化したモデルに対し、成層型貯水池におけるより一般的な水温解析モデルとして代表的なものが、Huber-Ryan-Harleman<sup>16)</sup>によるいわゆるM. I. T.モデルである。これは、先述した水温成層の特徴に基き貯水池を水深方向に細かく分割し、得られた水平層に対して水の連続式、水温収支則を適用したものである。貯留水の運動に関しては、洪

水時を除くとそれが極めて緩慢であることから、運動量保存則を省略して Kao<sup>26)</sup>あるいは Koh<sup>27)</sup>による選択取水式であらかじめ取水層及び流速分布を近似するとともに、流入水は同密度層へ流入するなどの仮定をおいた。これと同様の数学モデルは、Orlob-Selna<sup>17)</sup>、Park-Schmidt<sup>18)</sup>、わが国では安芸・白砂<sup>19)</sup>等によっても提案されているが、各モデルの主な相異点は、貯留水の運動学的挙動を規定する選択取水式にある。これらのモデルでは、分散（拡散）係数などのパラメータの値を適当に与えることにより、比較的容易にかつ十分な実用精度で水温成層の解析・予測を行いうることが実証されている。ところが、いずれも洪水時など変化が急な場合や、水平な水温成層の発達が十分でないときには、上述したような流れの仮定が満足されず、結果に問題を残すことが少なくない。すなわち、流れの挙動を厳密に解くことができない点が問題となる。

一方、濁水長期化及び富栄養化現象における濁度及び各種の水質濃度は、水深方向ばかりでなく流れ方向にも変化する。このため、こうした現象を対象とするときは、これまでに述べた水平層分割によるモデルでは十分な解析が行い得ない。そこで、最近では水平層を流れ方向にも分割した二次元の水理解析モデルもいくつか作成されてきた。貯水池水理に関する二次元モデルの最初は、流れ方向にも水温の変化を伴う弱成層型貯水池（中間型貯水池）を対象とした W. R. E. モデル<sup>20)</sup>であったが、わが国におけるこの種のモデルは、主として濁水現象を対象に開発されたといってもよい。これらには、M. I. T. モデルを基本にそれを流れ方向に展開した岩佐・野口らのもの<sup>22)</sup>、同様に安芸・白砂のモデルを展開した白砂・宮永らのもの<sup>21)</sup>があり、また、やや方法論は異なるが、芦田・江頭による濁度解析モデル<sup>15)</sup>もある。各モデルの実現象への適用結果は、いずれも比較的良好であるが、洪水時に水温成層が変形・破壊を受ける場合の水温・濁度分布の再現など、精度上十分といえない面も少なくない。こうした問題点は、いずれも先の M. I. T. モデルなどに対して指摘したと同じ原因によるもの、すなわち運動量保存則を省略したことに起因していると考えられる。

ここまでの数学モデルは、主として貯水池内の水温・濁度分布の挙動を取り扱ったものであったが、富栄養化を対象とするときには、さらに水質濃度の生物的・化学的変化をも考えなければならない。こうした変化機構は極めて複雑で、いまなお不明な部分が少なくない。しかし、この変化を経験的な事実あるいは室内実験による種々の研究成果から、単純な数学モデルに表現し、各水質濃度の挙動を解析する試みは、主として湖沼を対象に比較的古くから実施されている。これらは、経験的または巨視的なブラック・ボックス型モデルと<sup>28)</sup>、対象水域を一つあるいは数個の完全混合域とみなし、それに対して植物プランクトンを中心とする低次生態系の動的平衡を近似した動力学的モデル（擬似構造モデル）の2つに大別されるが、その大半は生物的・化学的変化に重点を置いたものであり、移流・拡散による水理的变化は無視されるか、あるいは極く単純化されたものであった。また、生物的・化学的変化の場を与える流れの挙動及び水温の変化は、光の照度と同様に外的な条件としてあらかじめ規定され、水質濃度変化と連立して取り扱われることは余りなかった。

このような生態学的モデルは、貯水池の富栄養化に対してもいくつか提案されており、例えば、1 ボックスの井上のもの<sup>29)</sup>、2 層あるいは3 層に分割した合田・海老瀬のもの<sup>14)</sup>、3 層の Anderson らのもの<sup>30)</sup> などがある。ところが、貯水池では湖沼に比べ貯水容量に対する流出入量が比較的大きく、移流などの水理的要因が水温及び各種の水質濃度変化に直接あるいは間接的に大きく影響するため、これらのモデルでは実際の富栄養化現象を十分に再現できないところもある。このため最近では、流れの運動学的挙動や水温変化を取り扱った前述の水理解析モデルに、各種の水質濃度保存則を組み合わせたモデルがいくつか提案されてきた。このなかには、M. I. T. モデルを応用した Marcofsky-Harleman のもの<sup>31)</sup>、Orlob-Selna のモデルを用いた Chen-Orlob のもの<sup>32)</sup>、Park-Schmidt モデルを用いた Schnoor-Fruh のもの<sup>33)</sup>、W. R. E. モデルを用いた Baca-Lorenzen-Mudd-Kimmel のもの<sup>34)</sup> などがある。わが国では宮永らが<sup>35)</sup>、安芸・白砂による鉛直一次元モデルを用いて、窒素・リンの物理的变化を解析した例がある。

これらはいずれも上述したような流れの場の挙動を求めることができるため、その水質変化への寄与をより忠実に反映した結果が期待されうるが、いくつかの問題点も残されている。すなわち、先に指摘したような各水理モデルのもつ問題点は依然として残されたままである。とくに、富栄養化は 1.5. でも述べたように水深方向ばかりでなく流れ方向にも変化する現象であるため、水平層分割による一次元モデルでは、その挙動を忠実に再現することは期待できないであろう。なお、水質の生物学的・化学的变化に関する従来のモデルについては、後に詳述することにする。

以上、貯水池水理すなわち水温、濁度及び富栄養化関係物質濃度の貯水池内における変化を取り扱った従来の数学モデルならびにその問題点を概括したが、以下ではこれらの問題点の解消を図るとともに、貯水池へ流入する支川等の影響をも考慮して、上述の各水理要素が示す現実の挙動をより忠実に取り扱う数学モデルの開発について述べることにする。

## 2.3. 貯水池水理のモデリングのための基礎事項

一般に水理現象のモデリングは、まず現象の認識から出発し、その記述を、流体の性質、流れの運動学的特徴、流れの場の3 側面から整理して記述モデルを構成し、それに基く方法論の選択を経て数学モデルに変換される<sup>6)</sup>。前章では、このうち貯水池における水理現象の認識とその記述を行ったが、以下ではそれに基づいて、モデリングのための基礎事項を上述の3 側面より整理する。

まず、貯水池における流体すなわち貯留水の性質は、水理学の立場からみると連続体としての要素、密度、圧縮性、粘性により代表される。このうち、貯留水の密度は、図-1-1 で示したように、主として水温に支配され、濁度（あるいは栄養塩濃度などの各種物質濃度）のそれに及ぼす影響は極めて小さい。また、同図より、貯水池でみられる程度の水温差（たかだか20℃程度）では、密度変化は1%にも達しないことから、貯留水の水理学的挙動を取り扱う上で密度変化は

ほとんど問題にならないと考えられる。したがって、水の圧縮性も考える必要はなく、貯留水は非圧縮性流体として取り扱う。

粘性については、速度勾配が大きな貯水池境界面ならびに水温成層境界面などで重要な要素であると考えられるが、その大きさについては今のところ十分に明らかにされていない。しかしながら、貯留水の流速が現在の流速計では測定不可能という極めて小さいことを考えれば、こうした粘性は無視しても差し支えないであろう。

つぎに、貯水池における流れは、水温成層の形成とその変化にみられるように熱輸送を伴うものであると同時に、濁質、栄養塩などの微細な浮遊物質あるいは溶存物質を含みそれらを輸送する流れでもある。しかし、水温は連続性の一つであり、濁質や他の水質物質も極めて微細な粒子あるいは溶解性物質より構成され、しかもそれらが水に比べてはるかに少ない量であることから、水温同様、連続体としての濁度、濃度で取り扱う。したがって、貯水池における流れを混相流と考える必要はないであろう。また、水温成層の存在により流れを2成層流あるいは多成層流と考える立場もあるが、上述した貯留水の密度変化の特性とそれに関係する諸要素の時間的・空間的变化のスケールを考えると、そうした密度流としての取扱いが必要となることは、実験室における基礎実験は別として少なく、実際に測られた例は見られない。

最後に、貯水池という流れの場を考えてみると、それは幾何形状より河川型と貯留型の2つに分類され、水理的には1.2.1.で述べたように成層型、中間型、混合型に分類されるが、いずれにおいても貯水池幅方向の水理要素の変化は小さく、富栄養化に伴う淡水赤潮や水の華といった特殊な生物的現象を対象とする場合以外にはこれを無視して考えてよい。

いま対象とする冷水、濁水長期化及び富栄養化の課題は、主として貯留型、成層型の貯水池で問題となることが多い。したがって、水深方向及び流れ方向に貯留水の性質ならびに流れの運動学的挙動が変化する場で解析を進めることになる。すなわち、1.3.から1.5.で述べたように、水温成層は、洪水による変形・破壊時を除くと、流れ方向にはほぼ一様で水深方向にのみ変化するが、濁度や富栄養化関係物質の濃度は流れ方向にも顕著な変化を示す。このため、これらを含めて解析する場合には、従来の水温解析モデルのように貯水池を水深方向に細分するばかりでなく、さらに流れ方向にも分割した体積要素について、水理解析を積み重ね、それによって各水理要素の全体の挙動を知るようにしなければならない。

なお、河川型、混合型に分類される貯水池での解析は、貯留型、成層型貯水池でのそれに準じ、より単純化すればよい。

## 2.4. 貯水池水理の数学モデル

### 2.4.1. 基礎原理とその適用

上述したように、対象とする貯留水の流れは、たとえそれが水温の分布をもち、また濁質や栄

養塩などの各種水質物質を含むものであっても、連続体として取り扱いうる。したがって、貯水池水理においても、水理解析の一般的な基礎概念である流体力学原理を出発点として、数学モデルが展開されることになる。これらの基礎原理は<sup>37)</sup>,

- i) 質量保存則
- ii) 運動量保存則
- iii) 熱力学の第一法則（エネルギー保存則）

である。

ところが、このうち質量保存則は、上述した貯留水の密度変化の特徴から、非圧縮性流体としての水の連続式と濁度（濃度）の収支則に変形することができる。一方、エネルギー保存則は機械的エネルギーに基くものに対して熱エネルギーに関する部分が極めて大きいことから、前者を無視して後者の熱収支則、すなわち水温収支則で代用されうる<sup>36)</sup>。

したがって、貯水池水理に対しては i) ～ iii) の基礎原理が、次の 4 つのものに変換されて適用される。

- 1) 水の連続式（非圧縮性流体の連続式）
- 2) 運動量保存則
- 3) 水温収支則
- 4) 濁度（濃度）収支則

これらの基礎原理は、システム解析法あるいはコントロール・ボリューム法のいずれかによって、水理解析のための数学モデルに変換されるが<sup>37)</sup>、これまでに述べたように、貯水池水理では後者を用いる必要がある。

## 2.4.2. 数 学 モ デ ル

以上に述べたことから、貯水池水理の解析のための基礎数学モデルは次のように記述される。

- 1) 水の連続式；

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{V}} = 0 \quad (2-1)$$

- 2) 運動量保存則；

$$\rho \frac{\partial \bar{\mathbf{V}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla)(\rho \bar{\mathbf{V}}) = -\nabla(\rho \bar{Q}) - \nabla \bar{p} + \nabla \cdot (\bar{\boldsymbol{\tau}} - \rho \bar{\mathbf{V}}' \bar{\mathbf{V}}') \quad (2-2)$$

- 3) 水温収支則；

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{V}} \cdot \nabla) \bar{T} + \nabla \cdot (\bar{T}' \bar{\mathbf{V}}') = \frac{\bar{H}}{\rho c_w} \quad (2-3)$$

- 4) 濁度（濃度）収支則；

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{V}} \nabla) \bar{c} + \nabla (\bar{c}' \bar{\mathbf{V}}') = 0 \quad (2-4)$$

ここに、各式は平均流に対するもので、各変数の $\bar{\phantom{x}}$ は時間的な平均操作を行った結果を示すものである。また、 $\mathbf{V}$ ；速度ベクトル、 $T$ ；水温、 $H$ ；単位容積、単位時間当りの発生熱量、 $\rho$ ；水の密度、 $c_w$ ；水の比熱、 $c$ ；濁度（濃度）、 $\mathcal{Q}$ ；外力のポテンシャル、 $p$ ；圧力、 $\tau$ ；応力テンソル、 $t$ ；時間、 $'$ ；各変数の時間的変動量である。

なお、富栄養化を対象とするときには、水質濃度の生物学的・化学的变化を取り扱う必要があるが、その場合には、(2-4)式の右辺に濃度の生産・消費項が付加される。すなわち、この場合の濃度収支則は

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{V}} \nabla) \bar{c} + \nabla (\bar{c}' \bar{\mathbf{V}}') = \bar{S} \quad (2-5)$$

となる。ここに $S$ ；単位時間当りの発生濃度である。

## 2.5. 水温、濁度予測のための数学モデル

### 2.5.1. 数学モデルの展開とそのための条件

(2-1)～(2-4)あるいは(2-5)式で示した基礎モデルは、貯水池内のある一点( $x, y, z$ )においてある時刻 $t$ に成立するものであり、これらの式を解いて各点、各時刻において求められる解を総合すれば、貯水池内での各水理要素の挙動を知ることができる。しかし、実際の解析にあたっては、この方法は実用的ではない。すなわち、実際上は、対象とする水理現象の時間的・空間的一様性やスケールに応じて、基礎モデルを適当な大きさの時間・空間内のものに変換し、そのなかでの平均水理量の挙動を追跡した方が都合が良く、またそれで十分である<sup>36)</sup>。時間的な解析スケールは、実際上、空間的スケールが決まれば数値解析の安定条件より拘束され、それはふつう現象のスケールより極めて小さいことが多い。したがって、数学モデルの展開は、空間的なものに対して行われることになる<sup>6)</sup>。

事実、従来の水温解析モデルは、成層型貯水池における夏季水温成層が、水深方向にのみ変化することから、貯水池を適当な厚さに水平分割した水平層について展開されたものであった。ところが、2.3.でも述べたように、水深方向ばかりでなく流れ方向にも変化する濁度や栄養塩などの挙動、あるいは洪水時における成層破壊過程などを解析し、予測する場合には、それらの変化のスケールに応じて貯水池を水深方向及び流れ方向に分割し、それについて数学モデルの展開を図らなければ現象を正しく明らかにすることができない。

したがって、貯水池水理を解析するための数学モデルは、(2-1)～(2-4)式(富栄養化を対象とするときには(2-5)式)を、図-2-1に示すようなブロックについて積分し、空間的な平均化操作を行うことにより得られることになる。

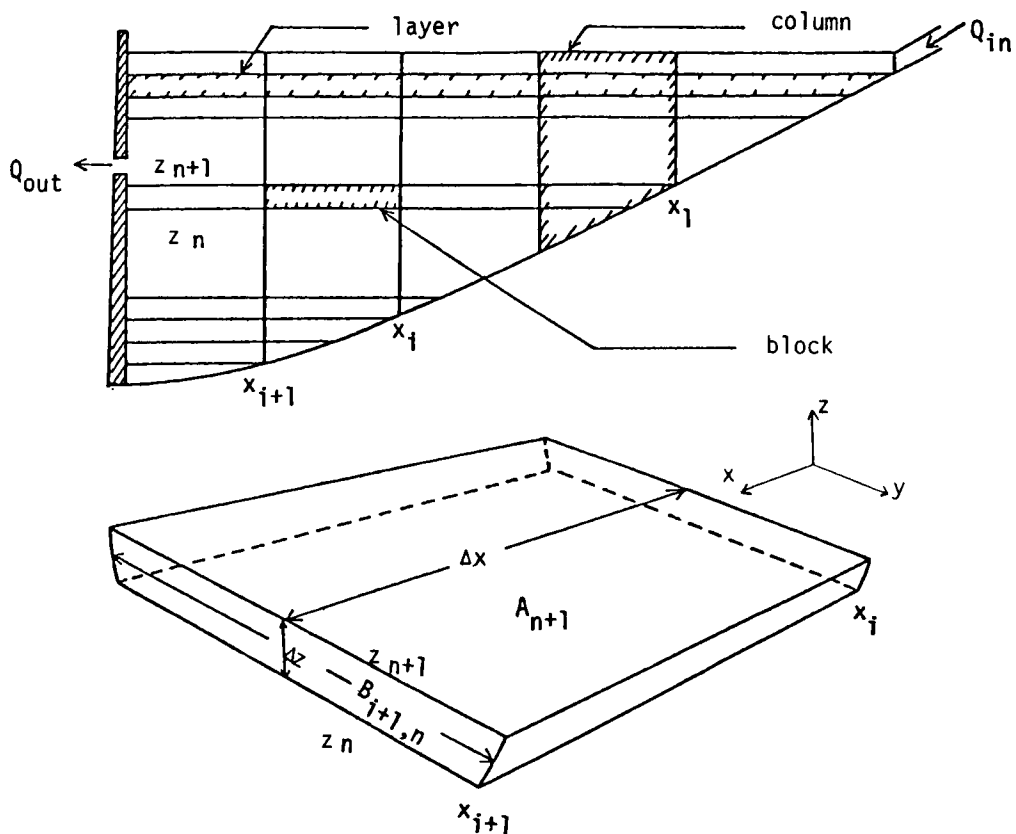


図-2-1 貯水池水理の解析に用いるコントロール・ボリューム

一方、この数学モデルを求めるための各種条件は、2.3.に述べた実際現象の特徴などに基いて、次のように与えられる。

- 1) 座標系とコントロール・ボリュームに関する条件；

座標系は、図-2-1に示すように流れ方向を  $x$  軸（流下方向を正）、貯水池幅方向を  $y$  軸（貯水池内から外向きが正）、水深方向を  $z$  軸（上向きが正）とする。このとき、コントロール・ボリュームとしてのブロックの諸元は、図-2-1のように、 $x$  方向の大きさを  $\Delta x (= x_{i+1} - x_i)$ 、 $y$  方向には貯水池幅  $B$ 、 $z$  方向には  $\Delta z (= z_{n+1} - z_n)$  とし、水平断面積  $A$  は  $A = \Delta x \cdot B$ 、体積  $V$  は  $V = A \cdot \Delta z = \Delta x \cdot B \cdot \Delta z$  で表わされるものとする。

- 2) コントロール・サーフェスでの幾何学的条件；

これは、開水路流れの水理解析に通常用いられるものであり<sup>6)</sup>、ここでの記述は省略する。

- 3) 貯水池水面、底面及び壁面（ブロック側面）での運動学的条件；

水面（自由表面）<sup>6)</sup>

$$\bar{w}_s = \frac{\partial z_s}{\partial t} + \bar{u}_s \frac{\partial z_s}{\partial x} + \bar{v}_s \frac{\partial z_s}{\partial y} \quad (2-6)$$



底面（固定床）<sup>6)</sup>

$$\bar{u}_{z_b} \cos z_b(x, n) + \bar{v}_{z_b} \cos z_b(y, n) + \bar{w}_{z_b} \cos z_b(z, n) = 0 \quad (2-7)$$

壁面<sup>38)</sup>

$$\bar{u}_{y_b} \cos y_b(x, n) + \bar{v}_{y_b} \cos y_b(y, n) + \bar{w}_{y_b} \cos y_b(z, n) = \bar{v}_{n_b} \quad (2-8)$$

ここに、 $u, v, w$ ;  $x, y, z$  方向の流速成分、 $n$ ; 各境界面から外向きに立てた単位法線ベクトル、添字  $s, z_b, y_b$ ; 水面、底面、壁面での値、 $v_{n_b}$ ; 壁面から直角に出る流れの流速である。 $v_{n_b}$  は支川の流入等がある場合を考えたもので、それがないブロックにおいては、 $v_{n_b} = 0$  である。

4) 流れに関する条件;

貯水池における流れは、 $x$  方向に関するものが極めて大きく、 $y, z$  方向には極めて緩やかであるため、 $z$  方向の加速度は無視しうる。このため  $z$  方向（水深方向）成分は静水圧分布で代用される。また、 $y$  方向については他の水理量の変化も考えない。

さらに、流れは完全な乱流で、粘性による影響は無視しうるものとする。

## 2.5.2. 水温、濁度の予測モデル

以上のようにして得られた貯水池水理の解析モデルは、水温、濁度を対象としたとき、次のようである。

1) 水の連続式;

$$\left| uB \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \Delta z + \left| wA \right|_{z_n}^{z_{n+1}} + q_b = 0 \quad (2-9)$$

2) 運動量保存則、 $x$  分値;

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} = & -\frac{1}{A} \left| uuB \right|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left| uwA \right|_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} u_b q_b - \frac{1}{A} \left| \frac{p}{\rho} B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \\ & + \frac{1}{A} \left| D_{mx} \frac{\partial u}{\partial x} B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left| D_{mz} \frac{\partial u}{\partial z} A \right|_{z_n}^{z_{n+1}} \end{aligned} \quad (2-10)$$

3) 運動量保存則、 $z$  分値（静水圧分布）

$$p = \int_z^{z_s} \rho g dz \quad (2-11)$$

4) 水温収支則;

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial t} = & -\frac{1}{A} \left| TuB \right|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left| TwA \right|_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} T_b q_b + \frac{1}{A} \left| D_{Tx} \frac{\partial T}{\partial x} B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \\ & + \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left| D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z} A \right|_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{\rho c_w A \cdot \Delta z} \left| \phi A \right|_{z_n}^{z_{n+1}} \end{aligned} \quad (2-12)$$

5) 濁度収支則；

$$\begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} = & -\frac{1}{A} \left[ cuB \right]_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left[ cwA \right]_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} c_b q_b + \frac{1}{A} \left[ D_{cx} \frac{\partial c}{\partial x} B \right]_{x_i}^{x_{i+1}} \\ & + \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left[ D_{cz} \frac{\partial c}{\partial z} A \right]_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left[ cw_0 A \right]_{z_n}^{z_{n+1}} \end{aligned} \quad (2-13)$$

ここで、 $q_b$  は

$$q_b = \int_{A_b} \bar{v}_{n_b} ds \quad (2-14)$$

であり、(2-12) 式の  $\phi$  は (2-3) 式の  $H$  を

$$H = -\partial \phi / \partial z \quad (2-15)$$

としたものである。また、運動量、水温、濃度の時間的変動量のコントロール・サーフェスでの各積分値は分散係数を用いて表わしている<sup>38)</sup>。

(2-9)～(2-13) 式は時間的ならびに空間的な平均値に対するものであるが、ここではその符号を省略している。また、既述のものを除く各記号は、 $q_b$ ；ブロック側面に流入する支川流量成分（流出が正）、 $A_b$ ；ブロック側面の面積、 $\phi$ ；日射による吸収熱量のフラックス、 $w_0$ ；濁度物質の沈降速度、 $D_{mx}$ 、 $D_{mz}$ ； $x$ 、 $z$  方向の運動量分散係数、 $D_{Tx}$ 、 $D_{Tz}$ ； $x$ 、 $z$  方向の温度分散係数、 $D_{cx}$ 、 $D_{cz}$ ； $x$ 、 $z$  方向の濁度分散係数、添字  $b$ ；ブロック側面における値、添字  $i$ 、 $i+1$ ； $x = x_i$ 、 $x_{i+1}$  における値、添字  $n$ 、 $n+1$ ； $z = z_n$ 、 $z_{n+1}$  における値である。

(2-9)～(2-13) 式は、貯水池中間層のブロックに対するものであるが、自由表面をもつ貯水池水面に接する最上層ブロックならびに底面に接するブロックでは、先に述べた各面での運動学的条件及び幾何学条件と運動量、水温、濃度に関する境界条件を使って、これらの式が変形されて用いられる。

貯水池水面に接するブロックでは、水面における運動学的条件が (2-6) 式、幾何学的条件が<sup>6)</sup>、

$$\cos_s(x, n) = -\frac{\partial z_s}{\partial x}, \cos_s(y, n) = -\frac{\partial z_s}{\partial y}, \cos_s(z, n) = 1 \quad (2-16)$$

であり、また、各水理量に関する境界条件は、

$$\overline{u' u'_s} \cos_s(x, n) + \overline{u' v'_s} \cos_s(y, n) + \overline{u' w'_s} \cos_s(z, n) = 0 \quad (2-17)$$

$$\overline{u' T'_s} \cos_s(x, n) + \overline{v' T'_s} \cos_s(y, n) + \overline{w' T'_s} \cos_s(z, n) = \frac{1}{\rho c_w} (\phi_a + \phi_L) \quad (2-18)$$

$$\overline{u' c'_s} \cos_s(x, n) + \overline{v' c'_s} \cos_s(y, n) + \overline{w' c'_s} \cos_s(z, n) = -w_0 \bar{c}_s \quad (2-19)$$

で与えられる。ここに、 $\phi_a$ ；長波による大気輻射及び逆輻射による熱量フラックス、 $\phi_L$ ；蒸発、

伝導による熱損失フラックスである。したがって、ここでの数学モデルは次のようになる。

1) 水の連続式；

$$\left| uB \Delta z_s \right|_{x_i}^{x_{i+1}} - wA \Big|_{z_{s-1}} + \int_{As} \frac{\partial \Delta z_s}{\partial t} ds + q_{b_s} = 0 \quad (2-20)$$

2) 運動量保存則， $x$  分値；

$$\begin{aligned} \frac{\partial (uV_s)}{\partial t} = & - \left| uuB \Delta z_s \right|_{x_i}^{x_{i+1}} + uwA \Big|_{z_{s-1}} - u_{b_s} q_{b_s} - \left| \frac{p}{\rho} B \Delta z_s \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \\ & + \left| D_{mx} \frac{\partial u}{\partial x} B \Delta z_s \right|_{x_i}^{x_{i+1}} - D_{mz} \frac{\partial u}{\partial z} A \Big|_{z_{s-1}} \end{aligned} \quad (2-21)$$

3) 運動量保存則， $z$  分値；

$$p = \int_z^{z_s} \rho g dz \quad (2-22)$$

4) 水温収支則；

$$\begin{aligned} \frac{\partial (TV_s)}{\partial t} = & - \left| TuB \Delta z_s \right|_{x_i}^{x_{i+1}} + TwA \Big|_{z_{s-1}} - T_{b_s} q_{b_s} + \left| D_{Tx} \frac{\partial T}{\partial x} B \Delta z_s \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \\ & - D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z} A \Big|_{z_{s-1}} - \frac{1}{\rho c_w} (\phi_a + \phi_L) A_s - \frac{1}{\rho c_w} \left| \phi A \right|_{z_{s-1}}^{z_s} \end{aligned} \quad (2-23)$$

5) 濁度収支則；

$$\begin{aligned} \frac{\partial (cV_s)}{\partial t} = & - \left| cuB \Delta z_s \right|_{x_i}^{x_{i+1}} + cwA \Big|_{z_{s-1}} - c_{b_s} q_{b_s} + \left| D_{cx} \frac{\partial c}{\partial x} B \Delta z_s \right|_{x_i}^{x_{i+1}} \\ & - D_{cz} \frac{\partial c}{\partial z} A \Big|_{z_{s-1}} + cw_0 A \Big|_{z_{s-1}} \end{aligned} \quad (2-24)$$

ここに、添字  $s, s-1$ ； $z = z_s$ （水面）， $z = z_{s-1}$ （水面を含むブロックの下側境界面）における値を示すものである。

貯水池底面に接するブロックでは、

$$\left. \begin{aligned} w_{z_b} &= 0, & D_{mz} \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z_b} &= 0 \\ D_{Tz} \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z_b} &= 0, & D_{cz} \frac{\partial c}{\partial z} \Big|_{z_b} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2-25)$$

与えられる境界条件を，(2-9)～(2-13)式に代入することにより，それらの各式を変形して用いることになる。

## 2.6. 富栄養化予測のための数学モデル

### 2.6.1. 水質指標とその生物学的変化に関するモデル

(2-9)～(2-13)式及び(2-20)～(2-24)式は、水温及び濁度を対象とするときのものであるが、栄養塩など富栄養化に関係する水質濃度を対象とするときには、(2-13)式及び(2-24)式の右辺に生物学的、化学的生産・消費の項を付加すればよい。すなわち、富栄養化に関係する各種水質濃度についての基礎モデル(2-5)式を展開した各濃度収支則を、(2-9)～(2-12)式ならびに(2-20)～(2-23)式に示した水の連続式、運動量保存則、水温収支則と連立したものが、貯水池における富栄養化の予測モデルとなる。

ところが、富栄養化を予測あるいは解析するにあたってまず問題となるのは、その指標すなわち上述した水質濃度に何を選択すればよいかである。従来より経験的には、富栄養化現象に関係する水質要素は、生態系の一次生産を担う植物プランクトンの現存量とその増減に関係する窒素、リン、炭素、ならびにある種のビタミン、微量無機元素などの栄養塩類、さらには捕食者である動物プランクトンの現存量であるとされている<sup>39)</sup>。しかし、水利用目的により問題とされる水質が異なったり、対象とする貯水池によって、植物及び動物プランクトンの優占種やそれらの増殖に対する制限因子が異なるため、水質指標として決まったものはない。

次の問題は、各種の要因に関係した複雑かつ多様な生物活動と、それに起因する各種の水質変化をいかに認識し、それをどのような数学モデルに表現するかである。すなわち、実際現象をできるだけ忠実に再現するには、(2-5)式の $S$ を、各種水質濃度についていかにモデル化すればよいかである。

この富栄養化に関係する生態学的過程は、従来の調査研究に基き、今日、一般的には、図-2-2のように考えられている。しかし、各水質要素間の関係ならびに水温、日射、流れなどの影響については、定量的にはもちろん定性的にも不明な点がまだ少なくない。

そこでまず、従来の富栄養化に関する数学モデルでこれらの問題がいかに取り扱われているかを、Ditoroら<sup>40)</sup>により論じられたものを中心に整理してみよう。

富栄養化に関係する低次生態系すなわち植物プランクトンの活動を中心とする生物学的生産・消費過程を数学モデルで近似する最初の試みは、上述したいくつかの関係要素のなかから、最も支配的と思われるものを一つ取り出し、その変化を取り扱うものであった。支配的な水質要素としては、植物プランクトン量(濃度)、リン、DO(溶存酸素)が取り上げられることが多く、他の関係物質の影響は係数に含めて考えられていた。これらの変化は、水温、日射、栄養塩濃度(窒素、リン)に関係する増殖率と動物プランクトンによる捕食及び内生呼吸による死滅とを合わせた死滅率とで表現されるのがふつうである。今日まで、こうした単変数生産・消費モデルには、Fleming(1939)、Riley(1946)<sup>40)</sup>(植物プランクトン)、合田・海老瀬<sup>39)</sup>(植物プランクトン、DO)、Sonzogniら<sup>41)</sup>、Lorenzenら<sup>42)</sup>、Chapra<sup>43)</sup>(リン)、宮永<sup>44)</sup>(DO)など多くのものが

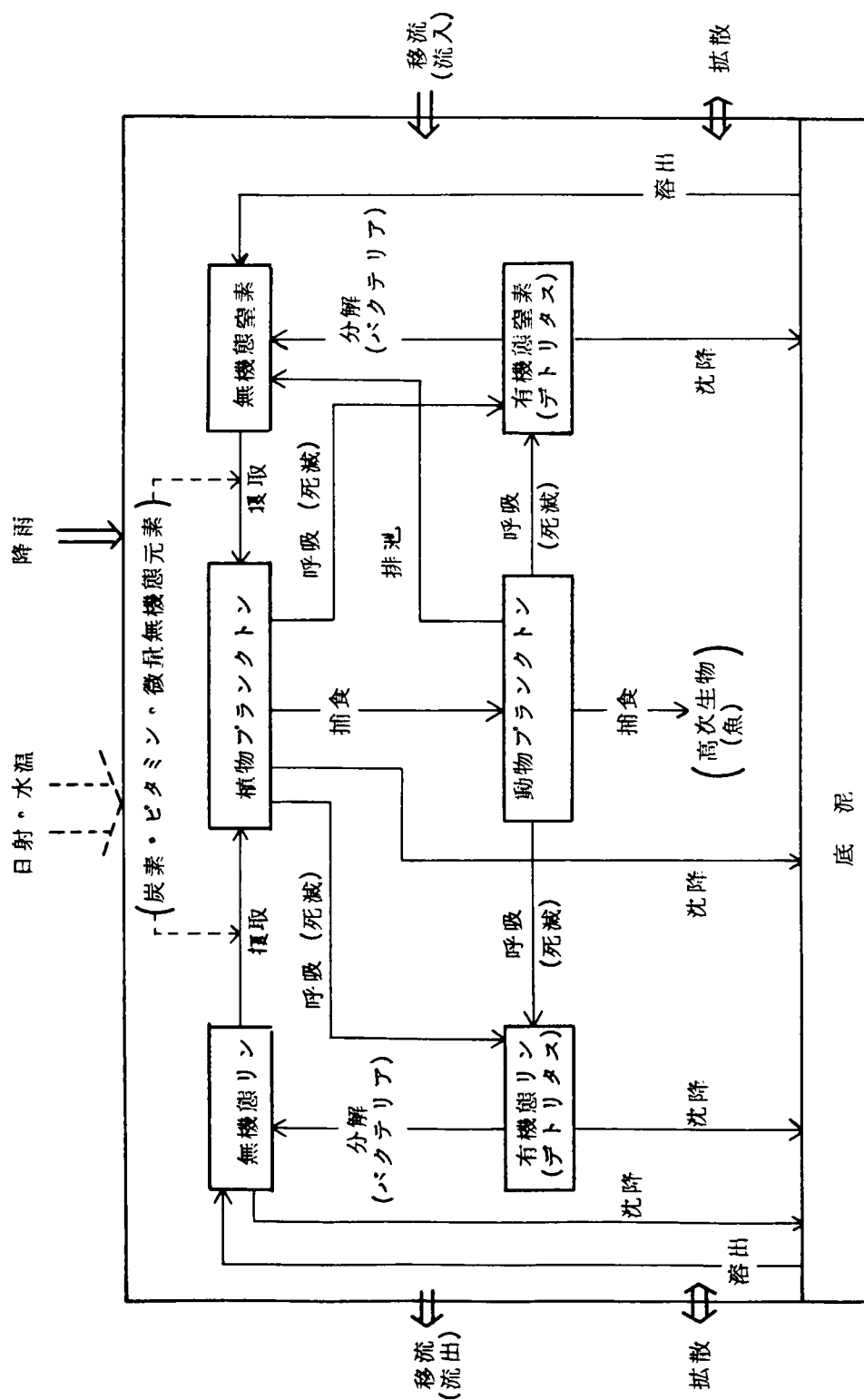


図 2-2 富栄養化に関する生態学的過程の概念図

ある。

一方、これら単変数生産・消費モデルに対して、富栄養化に関係するいくつかの水質要素の生物学的変化を、低次生態系の動的平衡として取り扱い、二つ以上の水質濃度保存式を連立して解く多変数動力学的モデルと呼ばれるものがある。こうしたモデルは、Riley ら(1949)により最初に提案され、Steele (1956)、Davidson ら(1966)を経て、Chen (1970)により富栄養化問題へ応用されて以来<sup>40)</sup>、Ditoro ら<sup>40), 45)</sup>、Anderson ら<sup>30)</sup>、Jørgensen<sup>46)</sup>、合田・海老瀬<sup>39)</sup>、井上<sup>29)</sup>、宗宮ら<sup>47)</sup>、津野ら<sup>48)</sup>など、種々の水域を対象に、多種多様のものがある。これらのモデルでは、主として植物プランクトン、動物プランクトン及び各種形態の窒素、リンの生物学的変化が、各水質指標濃度ならびに水温、日射等の関数として、種々に表現されており、その数学的挙動によってさらにいくつかに分けることができる。

以上のように、富栄養化に関する従来の数学モデル(擬似構造モデル)は、その水質指標とその生物学的変化の取扱いから、単変数生産・消費モデルと、多変数動力学的モデルの2つに大別される。これらは、さらに、解析対象とする水質濃度の種類及びその変化に関する数学的表現により細分されるが、一方でそれらに関していくつかの共通点も持っている。富栄養化に関するこうしたモデルの分類は、すでに津野<sup>49)</sup>、村松<sup>50)</sup>、村上<sup>51)</sup>らによって行われているが、ここでは、わが国における多変数動力学的モデルのいくつかを中心に、同様の整理をしてみると、表-2-2 のようである。表-2-2の最後には、後述する著者らの数学モデル<sup>3)</sup>をも示している。また、表-2-2に示した各モデルにおける、植物プランクトン(あるいはクロロフィルa)、動物プランクトン(あるいは炭素濃度)、窒素、リンの生物学的生産・消費項の数学的取扱いをまとめたものが、表-2-3~6である。

これらの表より、従来の富栄養化モデルに共通するモデリングの概念について概括すると、次のようである。

#### 1) 対象とする水質要素とその指標

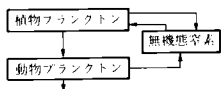
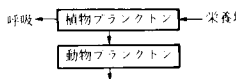
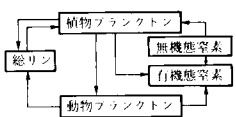
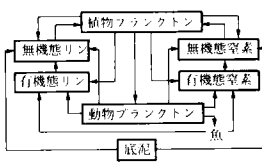
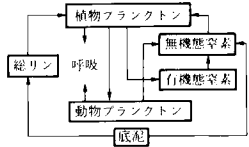
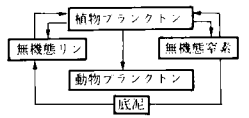
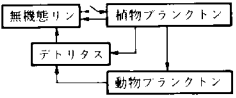
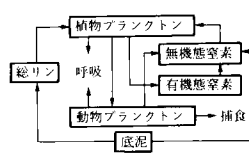
いずれも植物プランクトンの現存量を基本要素とし、この増減に関係する動物プランクトン量、ならびに窒素、リン濃度のすべて、または一部を取り扱っている。窒素、リンはその存在形態により、無機態、有機態のものに分けて取り扱われるのがふつうであるが、溶解性、浮遊性に分ける場合や、デトリタスとして取り扱うこともある。植物、動物プランクトンの現存量は個体密度、あるいはその平均量を表わすとされているクロロフィルa濃度、炭素濃度で表わされる。

表に示した以外のものでは、さらにCOD、BOD、DO等を対象としたり、窒素、リンをより細分化して取り扱った例もある<sup>52)</sup>。

#### 2) モデル構造ならびに水理過程の取扱い

岸ら<sup>54)</sup>及び著者ら<sup>3)</sup>のものを除く各モデルは、濃度保存式のみで構成されている。岸らは二次元潮汐流モデルを連立して流れの運動学的挙動を取り扱っている。一方、井上<sup>29)</sup>を除く

表—2—2 富栄養化解析モデルの比較

研究者	水質指標	モデル構成	水理過程	生物学的過程	対象水域	空間的 取扱い	計算期間
Ditoro, <sup>40)</sup> et al (1971)	植物プラン クトン 動物プラン クトン 無機態窒素	3 変数の濃度 保存式 (常微分方程 式系)	流出入に 伴う 移流項		San - Joaquin 川 河口部	1 ボックス (代表水域)	$\Delta t = 1$ 日 で 2 年間の計 算
井上 <sup>29)</sup> (1975)	植物プラン クトン 動物プラン クトン	2 変数の濃度 保存式 (常微分方程 式系)	取扱わな い		大ヶ瀬 貯水池	1 ボックス (マイクロ コスム)	$\Delta t = 1$ 日 で 約 1 ヶ月の 計算
土木学会 <sup>53)</sup> (1975)	植物プラン クトン 動物プラン クトン 無機態窒素 有機態窒素 総リン	5 変数の濃度 保存式 (常微分方程 式系)	流出入に 伴う 移流項		琵琶湖	南湖: 1 フロック 北湖: 2 フロック	$\Delta t = 0.1$ 日 で 3 年間計 算
Jørgensen <sup>45)</sup> (1976)	植物プラン クトン 動物プラン クトン 無機態窒素 有機態窒素 無機態リン 有機態リン	6 変数の濃度 保存式 (常微分方程 式系)	流出入に 伴う 移流項 ならびに 沈降項		Glumsø 湖	1 ボックス	$\Delta t =$ 数日 で 1 年間の 計算
宗宮 <sup>47)</sup> 海老瀬 奥川 (1978)	植物プラン クトン 動物プラン クトン 無機態窒素 有機態窒素 総リン	5 変数の濃度 保存式 (常微分方程 式系)	同上		琵琶湖 南湖	1 ボックス	$\Delta t = 0.1$ 日 で 3 年間計 算
津野 <sup>48)</sup> 相崎 合田 (1979)	植物プラン クトン (濃類) 無機態窒素 無機態リン	3 変数の濃度 保存式 (常微分方程 式系)	同上		霞ヶ浦 高浜入	3 ブロック	$\Delta t = 1$ 日 で 1 年間の計 算
岸 <sup>54)</sup> 中田 (1978)	植物プラン クトン 動物プラン クトン 無機態リン 有機態リン (デトリタス)	二次元非定常潮 汐流モデルなら びに 4 変数の濃度 保存式 (偏微分方程 式系)	移流項 および 拡散項		三河湾	詳細不明	詳細不明
岩佐 <sup>3)</sup> 松尾 (1979)	植物プラン クトン 動物プラン クトン 無機態窒素 有機態窒素 総リン	水の連続式 運動量保存式 水温収支式 5 変数の濃度 保存式 (偏微分方程 式系)	移流項 分散項 および 沈降項		室生 貯水池	流れ方向に 1 km 水深方向に 1 m で分割	$\Delta t =$ 数十 分～数時間 で 1 年間の 計算

表－２－３ 植物プランクトン濃度の生物学的変化に関するモデルの比較

	増 殖 率			呼 吸 率	捕 食 率 (死 滅)	そ の 他
	水 温	日 射 量	栄 養 塩			
Ditoro 等	比 例 型	指 数 型	窒素に対するMonod型	水温比例型	動物プランクトン濃度比例型	
井 上	比 例 型	比 例 型	リンに対するMonod型	水温比例型	動物プランクトン濃度比例型	
土木学会	比 例 型	指 数 型	窒素・リンに対するMonod型	水温比例型	動物プランクトン濃度比例型	
Jørgensen	指 数 型	指 数 型	窒素・リン・炭素に対するMonod型	水温指数型	飽食効果を考えた水温指数型	死滅率：定数
宗海老宮 奥瀬川	比 例 型 珪藻による 温度補正を 考慮	Monod型	窒素・リン に対する Monod型	水温比例型	飽食効果を考えた 動物プランクトン 濃度比例型	
津野 相崎 合田	比 例 型	指 数 型	窒素・リン に対する Monod型	水温比例型	水温比例型	増殖率に対するスペース効果, 植物プランクトン濃度の減少関数(指数型)
岸 中 田	—	指 数 型	リンに対するMonod型	定 数	飽食効果を考えた動物プランクトン濃度比例型	死亡率：定数
岩佐 松 尾	比 例 型	指 数 型	窒素・リン に対する Monod型	水温比例型	飽食効果を考えた動物プランクトン濃度比例型	

表－２－４ 動物プランクトン濃度の生物学的変化に関するモデルの比較

	増 殖 率	呼 吸 率	捕 殖 率 (死 滅)	そ の 他
Ditoro 等	飽食効果を考えた植物プランクトン濃度比例型	水温比例型	定 数	
井 上	飽食効果を考えた植物プランクトン濃度比例型	水温比例型	定 数	
土木学会	飽食効果を考えた植物プランクトン濃度比例型	水温比例型	定 数	
Jørgensen	飽食効果を考えた水温指数型	水温指数型	飽食効果を考えた水温指数型	死滅率：定数
宗海老宮 奥瀬川	飽食効果を考えた植物プランクトン濃度比例型	水温比例型	—	
津野 相崎 合田	—	—	—	
岸 中 田	飽食効果を考えた植物プランクトン濃度比例型	—	—	死滅率：定数 排泄率：増殖項に比例
岩佐 松 尾	飽食効果を考えた植物プランクトン濃度比例型	水温比例型	定 数	



表-2-5 窒素濃度の生物学的変化に関するモデルの比較

	取扱い	植物プランクトンの増殖に伴う項	プランクトンの自己呼吸に伴う項	動物プランクトンの排泄に伴う項	O-N (又はデトリタス) の分解項	I-Nの底泥からの溶出項	その他の
Di Toro等	無機	植物プランクトン増殖項に比例	動物プランクトン植物プランクトン自己呼吸項に比例	動物プランクトン増殖項に比例	—		
井上	—	—	—	—	—	—	
土木学会	無機 有機	植物プランクトン増殖項に比例	植物・動物プランクトンの自己呼吸項に比例(O-Nの増加)	—	O-Nに比例	—	動物プランクトンの捕食に伴う増減項(O-N) 動物プランクトンの死滅(捕食)に伴う増加項(O-N)
Jorgensen	無機 有機	植物プランクトン増殖項に比例	植物・動物プランクトンの自己呼吸項に比例	動物プランクトン増殖項に比例(O-Nの増加)	O-Nに比例 (分解率は水温指数型)	濃度と水温の関数	魚の排泄に伴うO-Nの増加項(濃度と水温の関数) I-N脱窒項(濃度に比例)
宮瀬川 宗海奥	無機 有機	植物プランクトン増殖項に比例	—	動物プランクトン増殖項に比例	O-Nの中でプランクトン内にあるものを除いた濃度に比例	年間一定	
津野 相崎 合田	無機	植物プランクトン増殖項に比例	植物プランクトンの自己呼吸項に比例	—	—	溶出パターンを考えている	
岸田 中	—	—	—	—	—	—	
佐尾 岩松	無機 有機	植物プランクトン増殖項に比例	—	動物プランクトン増殖項に比例	O-Nの中でプランクトン内にあるものを除いた濃度に比例	夏季大きく、冬季小さい季節変動を考えている	

表一2ー6 リン濃度の生物学的変化に関するモデルの比較

	取 扱 い	植物プランクトン の増殖に伴う項	プランクトンの 自己呼吸に伴う項	動物プランクトン の排 泄 に 伴 う 増加項	O-P (又はデトリ タス) の分解項	I-P又は総リンの 底泥からの溶出項	そ の 他
Di Toro 等	—	—	—	—	—	—	
井 上	—	—	—	—	—	—	
土木学会	総リン (無機)	植物プランクトン 増殖項に比例	植物・動物プラン クトンの自己呼吸 項に比例	—	—	—	動物プランクトンの捕食 に伴う増減項 動物プランクトンの死滅 (捕食) に伴う増加項
Jørgensen	無 機 有 機	植物プランクトン 増殖項に比例	植物・動物プラン クトンの自己呼吸 項に比例	動物プランクトン 増殖項に比例 (有機態)	O-P に比例 (分解率は水温指 数型)	リン濃度と水温の 関数	魚の排泄に伴う有機態リ ンの増加項 (濃度と水温の関数)
宮 老 瀬 川 宗 海 奥	総リン	—	—	—	—	年間一定	
津 野 崎 田 相 合	無 機	植物プランクトン 増殖項に比例	植物プランクトン の自己呼吸項に比 例	—	—	溶出パターンを考 えている	
岸 田 中	無 機 有 機 (デトリタス)	植物プランクトン 増殖項に同じ	植物プランクトン の自己呼吸項に同 じ	動物プランクトン 増殖項に比例 (有機態)	デトリタス濃度に 比例 (分解率は定 数)	—	植物・動物プランクトン の死滅項と同値のデトリ タスの増加項
岩 佐 松 尾	総リン	—	—	—	—	年間一定	

といずれも移流による物質輸送を取り扱っているが、拡散、沈降によるものは省略されることもある。また、水質変化に関係する水理的要因の取扱いはきわめて単純化されていることが多い。

### 3) 生物学的過程の取扱い

生物活動による水質変化機構の取扱いは、表-2-2に示すとおりであるが、そうした生物学的生産・消費による各水質濃度の変化率は具体的には次のように表現されている。

#### i) 植物プランクトン濃度（クロロフィル a 濃度）

$$\begin{aligned} (\text{生産} \cdot \text{消費率}) = [(\text{増殖率}) - (\text{呼吸率}) - (\text{捕食率})] \\ \times (\text{植物プランクトン濃度}) \end{aligned} \quad (2-26)$$

#### ii) 動物プランクトン濃度（炭素濃度）

$$\begin{aligned} (\text{生産} \cdot \text{消費率}) = [(\text{増殖率}) - (\text{呼吸率}) - (\text{捕食 or 死滅率})] \\ \times (\text{動物プランクトン濃度}) \end{aligned} \quad (2-27)$$

#### iii) 窒素及びリン濃度

$$\begin{aligned} (\text{生産} \cdot \text{消費率}) = (\text{植物プランクトンの増殖に伴う変化率}) \\ + (\text{植物及び動物プランクトンの呼吸に伴う変化率}) \\ + (\text{動物プランクトンの排泄に伴う変化率}) \\ + (\text{分解率}) + (\text{溶出率}) \end{aligned} \quad (2-28)$$

これらの式の各項のなかには、モデルによっては省略されるものもある。また、(2-28)式の溶出項は無機態窒素、リンに対するものであり、その他の項は、無機態か有機態かで符号が逆となる。

(2-26)～(2-28)式における各項の表現は、表-2-3～6に示すようであるが、これらは、水温及び日射量といった物理的要素に対しては一次比例型、または高温障害、強光障害を考えた指数型の関数で表わされることが多く、生物学的・化学的要素である栄養塩などの各水質濃度に対しては Monod 型の関数で表わされるのがふつうである。

### 4) 空間的ならびに時間的スケールの取扱い

空間的には、岸・中田及び著者らを除き、対象水域を1個あるいは数個の完全混合域とみなし、各種水質の分布は取り扱っていない。時間的スケールに関しては、富栄養化現象が比較的スケールの長い、むしろ季節的なものであることから、1年間かあるいはそれ以上を対象期間とすることが多いが、実際の解析に用いる時間間隔は1日以下にとるのがふつうである。

以上の1)～4)に述べたことは、表-2-2からもわかるように、主として湖沼、海洋を対象とするモデルに関するものであり、2.2で述べた貯水池を対象とするモデル、とくに水理解析法

を用いた最近のものに対しては、2)、4)はそのまま当てはまらない。しかし、他の点については、ほぼ同様と考えてよい。

## 2.6.2. 富栄養化の予測モデル

2.6.1. で述べた従来の富栄養化モデルに共通した水質要素及びその生物学的変化に関するモデリングの概念は、経験的な事実ならびに生態学的、生物学的な諸研究成果に基くものであり、今日一般に容認されているものであると考えられる。したがって、ここでは、これらの概念に基づいて、富栄養化解析のための濃度収支則を導くことにする。

まず、富栄養化解析のための水質指標は、従来の多くのモデルと同様に、植物プランクトンの挙動を中心に考えることにし、その現存量を、多種類のものから成る個体数と一次比例の関係にありしかも測定が容易なクロロフィルa濃度で表わすことにする。また、この植物プランクトンの現存量変化に大きな影響を及ぼす要素として、捕食者である動物プランクトンの量と栄養塩である窒素及びリンの濃度を選び、前者については、把握が困難な個体数に代えて炭素濃度を指標とする。窒素、リンに関しては、その存在形態より、生体中のもの、溶解性のイオン状態のもの、浮遊物に付着しているものなど各種のものが考えられるが、ここでは、植物プランクトンを中心としたそれらの循環過程に着目し、窒素は無機態のものと有機態のものに分けて考えられることにする。しかし、リンについては、有機態から無機態のものへの分解速度が極めて速いことが知られており、また、その濃度自体がごく微量で評価が容易でないことなどから、両者に分けることなく全リン濃度として取り扱う。

次に、先に述べた一般的な概念にしたがって、これら水質要素間の関係を図-2-3に示すように考え、同時に、各水質濃度の生産・消費率に対する水温、日射量及び各濃度自体の影響を、従来の経験的ならびに実験的事実に基いて図-2-4のように考える。すなわち、各水質濃度の生産・消費率を従来と同様に(2-26)~(2-28)式のように記述すると同時に(ただしここでは、(2-28)式の右辺第2項は考えない)、各項を表-2-3~6の最後に示したような関数形で表現する。

このようにして、富栄養化現象の指標となる水質濃度と、その生物学的生産・消費による変化率、すなわち、(2-5)式の $S$ が記述されると、富栄養化解析のための濃度収支則が得られることになる。

得られた結果は次のようである。いま、濃度収支則を貯水池中間層のブロックについて階差式に展開し、

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial c}{\partial t} &= F(c) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left| c w_0 A \right|_{z_n}^{z_{n+1}} + S \\ F(c) &= -\frac{1}{A} \left| c u B \right|_{x_i}^{x_{i+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left| c w A \right|_{z_n}^{z_{n+1}} - \frac{1}{A \cdot \Delta z} c_b q_b \end{aligned} \right\} \quad (2-29)$$

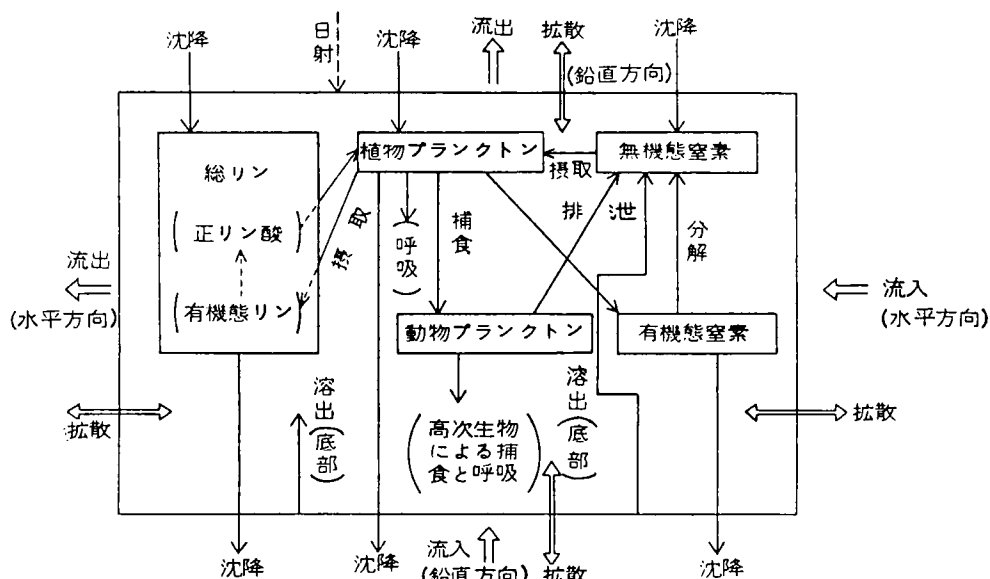


図-2-3 コントロール・ボリューム内における各種水質変化の概念

$$+ \frac{1}{A} \left[ D_{cx} \frac{\partial c}{\partial x} B \right]_{x_i}^{x_{i+1}} + \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left[ D_{cz} \frac{\partial c}{\partial z} A \right]_{z_n}^{z_{n+1}} \Bigg]$$

のように書くとき、クロロフィル a 濃度  $C_P$  (植物プランクトン量)、動物プランクトンに相当する炭素濃度  $Z$ 、無機態窒素濃度  $N_I$ 、有機態窒素濃度  $N_O$ 、全リン濃度  $P_h$  の濃度収支則は、次の各式で表わされる。

$$\frac{\partial C_P}{\partial t} = F(C_P) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left[ C_P \cdot w_{0C_P} \cdot A \right]_{z_n}^{z_{n+1}} + G_{C_P} - K_A T C_P - G_Z \quad (2-30)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = F(Z) + \alpha a_z G_Z - K_Z T Z - K_O Z \quad (2-31)$$

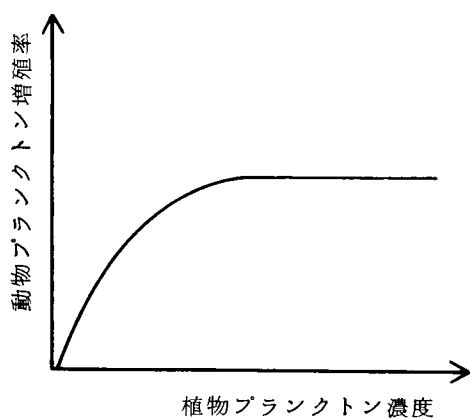
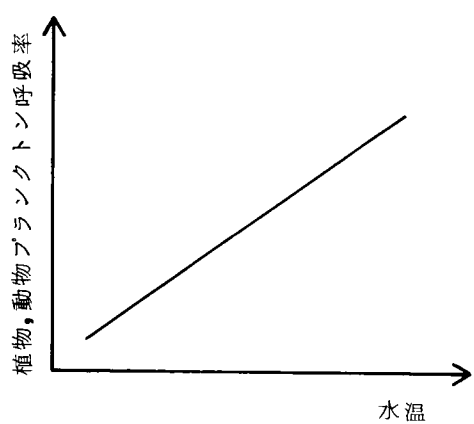
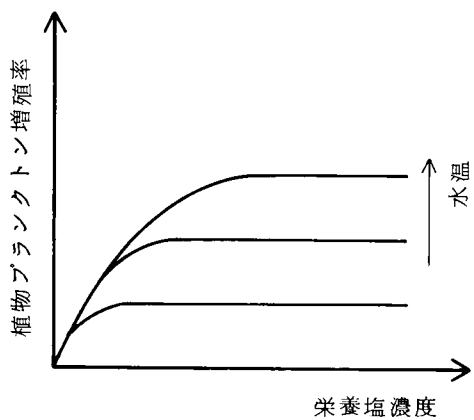
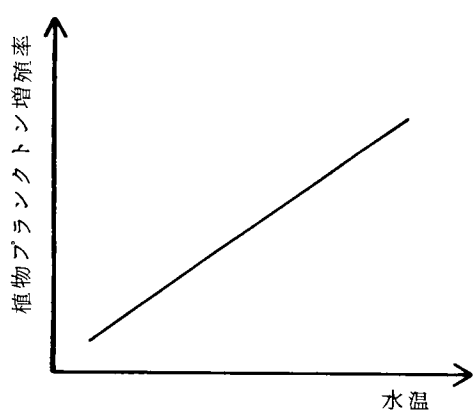
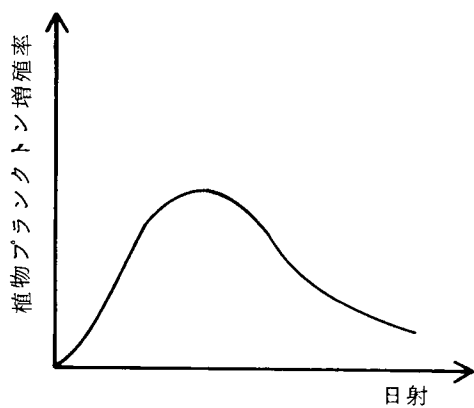
$$\frac{\partial N_I}{\partial t} = F(N_I) - \beta G_{C_P} + K_L (N_O - \beta C_P - \gamma Z) + \beta (1 - a_z) G_Z + \frac{E_{N_I}}{1000 \cdot \Delta z} \quad (2-32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_O}{\partial t} = & F(N_O) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left[ N_O \cdot w_{0N_O} \cdot A \right]_{z_n}^{z_{n+1}} + \beta G_{C_P} - K_L (N_O - \beta C_P - \gamma Z) \\ & - \beta (1 - a_z) G_Z \end{aligned} \quad (2-33)$$

$$\frac{\partial P_h}{\partial t} = F(P_h) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} \left[ P_h \cdot w_{0P_h} \cdot A \right]_{z_n}^{z_{n+1}} + \frac{E_{P_h}}{1000 \cdot \Delta z} \quad (2-34)$$

ただし、

$$G_{C_P} = \mu_c \cdot K_\mu \cdot T \cdot \frac{I_{z_n}}{I_s} \exp \left[ 1 - \frac{I_{z_n}}{I_s} \right] \cdot \frac{N_I}{K_N + N_I} \cdot \frac{P_h}{K_P + P_h} \cdot C_P \quad (2-35)$$



図－２－４ 水質の生物学的生産・消費率と影響因子との関係

$$G_z = C_g \cdot \frac{K_{C_P}}{K_{C_P} + C_P} \cdot Z \cdot C_P \quad (2-36)$$

ここに、 $G_{C_P}$ ；植物プランクトンの増殖による  $C_P$  の生成濃度、 $G_z$ ；動物プランクトンの捕食による  $C_P$  の消滅濃度、 $\mu_c$ ； $C_P$  の最大生成率（植物プランクトンの最大増殖率）、 $K_\mu$ ； $\mu_c$  の水温比例定数、 $I_{z_n}$ 、 $z = z_n$  における日射量、 $I_s$ ；最適日射量、 $K_N$ 、 $K_P$ 、 $K_{C_P}$ ；それぞれ  $N_I$ 、 $P_h$ 、 $C_P$  に関する Michaelis 定数、 $K_A$ 、 $K_Z$ ；植物、動物プランクトンの呼吸による  $C_P$ 、 $Z$  の消滅率（呼吸率）、 $C_g$ ；捕食率、 $\alpha$ ；植物プランクトン中の炭素量とクロロフィル a 量との比、 $a_z$ ；同化率、 $K_o$ ；動物プランクトンの死亡による  $Z$  の消滅率、 $\beta$ ；植物プランクトン中の窒素量とクロロフィル a 量との比、 $K_L$ ；分解率（無機化定数）、 $r$ ；動物プランクトン中の窒素量と炭素量との比、 $E_{P_h}$ 、 $E_{N_I}$ 、 $P_h$ 、 $N_I$  の単位面積、単位時間当りの溶出濃度、 $w_{0C_P}$ 、 $w_{0N_O}$ 、 $w_{0P_h}$ ；それぞれクロロフィル a、有機態窒素、総リンの沈降速度である。動物プランクトン、無機態窒素の沈降速度については、前者は自泳力があり、後者は主として溶解性のものであることから、いずれも考えていない。

貯水池の富栄養化を予測あるいは解析するための数学モデルは、上述の (2-30)～(2-34) 式を (2-9)～(2-12) 式と連立したものとなる。なお、貯水池水面を含むブロックについては、(2-20)～(2-24) 式と同様に各式が変形され、また底面を含むブロックでは (2-25) 式の条件が用いられる。

## 参 考 文 献

- 1) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭；洪水時における貯水池の成層破壊について，京都大学防災研究所年報，第20号-B，1977，pp.259～270.
- 2) 岩佐義朗・松尾直規・井上素行；貯水池における濁度解析について，京都大学防災研究所年報第21号-B，1978，pp.319～329.
- 3) 岩佐義朗・松尾直規・俞朝夫；貯水池水理の数値解析法とその適用について，京都大学防災研究所年報第22号-B，1979，pp.341～354.
- 4) 松尾直規・岩佐義朗；貯水池における水理特性の変化とその予測，第24回水理講演会論文集，1980年，pp.251～258.
- 5) Iwasa, Y. and Matsuo, N., Estimation of turbidity in reservoirs, Proc. XIX Congress of IAHR, Subject A (a), New Delhi, India, 1981, pp.26～34.
- 6) 岩佐義朗；開水路流れのモデリング法，1980年度水工学に関する夏期研修会講義集，80-A-3，1980.
- 7) 岩佐義朗；水理システムとシミュレーション，1971年度水工学に関する夏期研修会講義集，71-A-3，1971.
- 8) Burt, W.V.; A Forecast of temperature conditions for the reservoir behind of the proposed

- Bruces Eddy Dam, Water Reserch Associates, Corvallis, Ore., April, 1960.
- 9) Raphael, J.M.; Prediction of temperature in rivers and reservoirs, Jour. of Power Division, ASCE, Vol.88, PO2, 1962, pp.157~181.
  - 10) 村本嘉雄, 道上正規, 藤田裕一郎; 貯水池における微細粒子の堆積と濁度に関する調査, 第21回水理講演会論文集, 1977, pp. 21~26.
  - 11) 岸 力; 小貯水池の濁りについて, 利水評論, 北海道広域利水調査会, No.11, 1974, pp. 10.
  - 12) Song, C.C.S., Pabst, A.F. and Bowers, C.E.; Stochastic analysis of air and water temperatures, Jour. of Environmental Engineering Division, ASCE, Vol.99, No.EE6, 1973, pp.785~800.
  - 13) Watanabe, Y. and Ohono, T.; Water temperature analysis in reservoirs using stochastic system models, Third International Symposium on Stochastic Hydraulics, Tokyo, Japan, 1980, pp.551~561.
  - 14) 合田健・海老瀬潜一; 水質の変化とその予報に関する研究(成層流における水質変化について), 第9回衛生工学研究討論会講演論文集, 1973, pp. 208~216.
  - 15) 芦田和男・江頭進治; 成層化した貯水池における濁度物質の挙動, 第21回水理講演会論文集, 1977, pp. 39~44.
  - 16) Huber, W.C., Harleman, D.R.F. and Ryan, P.J.; Temperature prediction in stratified reservoirs, Jour. of Hydraulics Division, ASCE, Vol.98, HY-4, 1972, pp.645~666.
  - 17) Orlob, G.T. and Selna, L.G.; Temperature variations in deep reservoirs, Jour. of Hydraulics Division, ASCE, HY-2, 1970, pp.391~409.
  - 18) Park, G.G. and Schmidt, P.S.; Numerical modeling of thermal stratification in a reservoir with large discharge-to-volume ratio, Water Resources Bulletin, AWRA, Vol.9, No.5, 1973, pp.933~941.
  - 19) 安芸周一・白砂孝夫; 貯水池流動形態のシミュレーション解析, その1, 発電水力, No.134, 1975, pp. 37~50.
  - 20) Water Resource Engineers, Inc. Walnut Creek, California; Mathematical Models for the Prediction of Thermal Energy Changes in Impoundments, 1969.
  - 21) 白砂孝夫・宮永洋一; 貯水池内の濁度の二次元解析, 第32回土木学会年次学術講演会講演概要集, 1977, pp. 336~337.
  - 22) 岩佐義朗・野口正人・児島章; 貯水池内の水温成層予測法について, 京都大学防災研究所年報第18号-B, 1975, pp. 565~573.
  - 23) Dake, J.M.K., and Harleman, D.R.F.; An Analytical and Experimental Investigation in Lakes and Ponds, MIT Report, No.99, 1966.
  - 24) 岩佐義朗・井上和也・野口正人; ダム貯水池の成層化過程, 京都大学防災研究所年報第16



- 号-B, 1973, pp.495~503.
- 25) Craya, A; Theoretical reserch on the flow of non-homogeneous fluids, Laitouille Blanche, Jan-Feb, 1949.
  - 26) Kao, T.W.; A free-streamline solution for stratified flow into a line sink, Jour. of Fluid Mech., Vol.21, Part 3, 1965, pp.815~822.
  - 27) Brooks, N.H. and Koh, R.C.H.; Selective withdrawal from density-stratified reservoirs, Jour. of Hydraulics Division, ASCE, Vol.95, HY-4, 1969, pp.1379~1400.
  - 28) 例えば, Vollenwider, R.A.; Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication, Mem, Ist Ital, Idrobio, Vol.33, 1976, pp.53.
  - 29) 建設省近畿地建淀川ダム統合管理事務所; 昭和49年度宇治川汚濁調査報告書, 1975, pp. 55~84.
  - 30) Anderson, D.R., Pracup, J.A., Fogarty, T.J. and Willis, R.; Water quality modelling of deep reservoirs, Jour. of Water Pollution Control Federation, 1976.
  - 31) Marcofsky, M. and Harleman, D.R.F.; A Predictive Model for Thermal Stratification and Water Quality in Reservoirs, MIT Report 134, 1971.
  - 32) Chen, C.W. and Orlob, G.T.; Predicting quality effects of pumped storage, Jour. of Power Division, ASCE, Vol.98, PO-1, 1972, pp.65~75.
  - 33) Schnoor, J.L. and Fruh, E.G.; Dissolved oxygen model of a short detention time reservoir with anaerobic hypolimnion, Water Resources Bulletin, AWRS, Vol.15, No.2, 1979, pp.506~518.
  - 34) Baca, R.G., Lorenzen, M.W., Mudd, R.D. and Kimmel, L.V.; A Generalized Water Quality Model for Eutrophic Lakes and Reservoirs, Battele Pacific Northwest Labs., Report for U.S. EPA, 1974.
  - 35) 宮永洋一・安芸周一・秋元保・斉藤茂; 貯水池内における濁度および栄養塩の挙動の数値解析, 第22回水理講演会論文集, 1978, pp.119~124.
  - 36) 岩佐義朗; ダム貯水池における水理特性, 建設省河川局編日本河川水質年鑑, 研究編, pp. 797~815, 1977年.
  - 37) 岩佐義朗; 水理学の解析法, 石原藤次郎編, 水工水理学, 丸善, 1972.
  - 38) Imasa, Y.; Mathematical aspect of one-dimensional equations of unsteady flows in open channels, Proc. International Symposium on Unsteady Flow in Open Channels, Newcastle-upon-Tyne, IAHR-BHRA, 1976, pp.D2-13~D2-24.
  - 39) 合田健・海老瀬潜一; ダム貯水池の富栄養化とシミュレーション, 土木学会論文報告書, 第263号, 1977, pp.49~61.
  - 40) Ditoro, D.M., O'connor, D.J., and Thomann, R.V.; A Dynamic model of phytoplankton

- population in the Sacramento-San Joaquin Delta, *Advances in Chemistry Series*, Vol.106, 1971, pp.131~180.
- 41) Sonzogni, W.C., Uttormark, P.C., and Lee, G.F.; Phosphorus residence time model, *Water Research* Vol.10, 1976, pp.
- 42) Lorenzen, M.W., Smith, D.J. and Kimmel, L.V.; *Modelling Biochemical Process in Aquatic Ecosystem*, Ann Arbor Science Publishers, Inc. 1976.
- 43) Chapra, S.C.; Total phosphorous model for the Great Lakes, *Jour. of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.103, No.EE-2, 1977, pp.
- 44) 宮永洋一；成層化した貯水池における溶存酸素の分布，第24回水理講演会論文集，1980，pp. 237～244.
- 45) Thomann, R.V., Ditoro, D.M. and O'Connor D.J.; Preliminary model of Potomac Estuary phytoplankton, *Jour. of Environmental Engineering*, ASCE, Vol.100, No. EE3, 1974.
- 46) Jørgensen, S.E.; A eutrophication model of water systems, *Ecological Modelling*, Vol.2, No.2, 1976.
- 47) 宗宮功・海老瀬潜一・奥川光治；琵琶湖南湖におけるプランクトンと栄養塩類の挙動，衛生工学研究シンポジウム講演論文集，1978，pp. 58～62.
- 48) 津野洋・相崎宇弘・合田健；霞ヶ浦高浜入における藻類増殖のシミュレーションに関する研究，国立公害研究所報告第6号，1979，pp. 273～280.
- 49) 津野洋；微生物による基質の摂取・代謝の動力学モデル化に関する研究，京都大学学位論文.
- 50) 村松晃；二次汚濁の影響予測実例，環境創造，1977，pp. 60～64.
- 51) 村上健；富栄養化による有機性汚濁のモデリング，1979年度水工学に関する夏期研修会講義集，79-A-8，1979.
- 52) 例えば前出の31)や32).
- 53) 土木学会；琵琶湖の将来水質に関する調査報告書，1975.
- 54) 岸道郎・中田喜三郎；内湾低次生態系のシミュレーションと問題点，*海洋科学*，Vol.10，No.10，1978，pp. 796～806.

## 第3章 貯水池における水温，濁度ならびに 富栄養化指標の数値解析法

### 3.1. 概 説

2.5. 及び 2.6. に示した数学モデルを実際の貯水池へ適用し，与えられた境界条件，初期条件のもとで，貯留水の運動学的挙動や水温，濁度及び富栄養化指標の時間的・空間的变化を求めるためには，コンピューターを使った数値解析法によらなければならない。すなわち，得られた数学モデルを何らかの方法で数値計算を実施しうる形に変形する必要がある。ここでは，階差式による数学モデルを用い数値計算を進めることにする。

いま対象とするような開水路流れの数値解析法には種々のものがあるが<sup>1)</sup>，時間的には，i) explicit 法と ii) implicit 法のいずれかに大別される。i) の方法では，ある時刻での既知量を使って次の時刻での未知量が陽に解かれるため，数値解法が比較的容易でプログラミングも簡単となる反面，計算の安定性に関して ii) より厳しい条件が課せられるという特徴がある。一方，ii) の方法は，陽に解かれない階差式となるため，解法及びプログラミングが i) より複雑となるが，計算の安定性に関する条件は極めて緩やかになるとされている。貯水池水理の数値解析を実施する場合，いずれが適当かは一概にいえないが，計算に用いる時間間隔は安定条件を満たすばかりでなく，実際現象の時間スケールの面からも考えられなければならないことや，電子計算機による計算処理の高速化がめざましい現実を考えると，安定条件による時間的な制約は，實際上余り大きな要素とはならないように思われる。

事実，開水路流れの数値解析では explicit 型の方法を用いる方が多いようであるが，このうちでも，貯水池水理で対象とするような非定常な二次元流れに対しては，staggered-scheme による計算法を用いるのが最も一般的であろう。この計算法は，求めるべき未知数が時間的にも空間的にも交互に配置された形のもので<sup>2)</sup>，従来より高潮解析や湖流解析などに広く用いられている。その他の数値解析法，例えば有限要素法や特性曲線法などによる解析例もあるが<sup>3), 4)</sup>，これらの方法ではいくつかの利点がある反面，計算式が複雑となり解法上困難な問題を生じることも少なくないとされ，貯水池水理を対象とする場合には特に有利な方法とはいえないようである。

さらに，これまでの貯水池水理に関する数値解析法に限ってみれば，その多くは explicit 型の計算法である。例えば，Harleman らによる M. I. T. モデルの数値解法には，explicit 法の一つである up-wind difference 法が用いられている<sup>5)</sup>。この方法は，流速の方向によって空間的な差分のとり方を適当に変えていくものであり，安定な計算を進めると同時に，コントロール・ボリューム内へ出入りする熱量及び物質のフラックスの向きを考慮して計算を進めるものである。一方，生物学的生産・消費項を含む富栄養化の数値解析では，予測子修正子法（explicit 法の一つ）の

一つである Runge-kutta 法を用いることが多い<sup>6)</sup>。この方法は非線形項としての生産・消費項に関する数値解の安定を図ったものである。

以上、水理解析のための数値解法と貯水池水理に関して良く用いられる解法について簡単に述べてきた。その結論として、最初に述べたここでの数値解析においては、解法の容易さ、解の安定性、さらには数学モデルの性質から判断して、従来より一般的な staggered 差分法、up-wind-difference 法、Runge-kutta 法の適用を図ればよいと思われる。

つぎに、数値解析を実施するにあたっては、連続量を離散量で置き換えることによる離散化誤差や電子計算機による数値の打ち切り誤差に伴って生じる諸問題、すなわち、i) 安定性、ii) 収束性、iii) 適切性、iv) 一貫性や<sup>1)</sup>数値的散逸、数値的分散<sup>2)</sup>などを考慮しておく必要がある。これらの問題の概要とその数学的議論については、いくつかの文献<sup>7)</sup>に示されているが、i)～iv)の性質は、必ず満足しなければならないとされている。i)～iv)のうち、ii)は他の性質を満たせば一般に保証されるとされており、また、iii)、iv)はいま対象とする数学モデルと上述した各数値解法についてはすでに満足されていると考えてよい。したがって、実際の計算にあたって問題となるのは i)の安定性である。この安定性に関する条件は、いくつかの特定の方程式に対しては詳しく議論され、種々の条件が示されてはいるが<sup>7)</sup>、実際上は個々の問題に対してそれらをそのまま適用することは少ない。このため、実際の計算では、その実施段階で試行錯誤的に安定条件を検討しなければならないことも少なくないようである。

最後に、数学モデルを実際に適用する場合考えておかななければならないことに、計算を実施するための各種の条件、すなわち、実際の貯水池における環境境界条件、計算開始時の初期条件、分散係数、沈降速度など種々のパラメータの値、さらには解析に用いる  $\Delta x$ 、 $\Delta z$  の値に関する問題がある。もちろん、上述したような各種条件は、対象とする貯水池における種々の実測資料に基づいて与えられるべきであるが、実際には、流出入流量ならびに気象条件に関する資料を除くと、その他は水温に関するものが比較的整っている程度で、必要な資料が十分に収集、整備されていないのがふつうである。このため、このうちのいくつかについては、それを単純化して考え経験的あるいは実験的に得られた値や方法を使って与えているのが実状である。

ところが、こうした従来の設定条件のなかには、実際の環境境界条件及びそれに対応した現象の時間的・空間的スケールと照らし合わせたとき、水理学的にみて妥当なものとはいえず、その結果として現実の姿を忠実に再現できないような場合もある。例えば、従来より濁度に関する沈降速度は、時間的・空間的に一定な平均値として取り扱われ、Stokes の式を用いて計算されていたが、こうした解析では現実の濁質粒度分布を反映できないために、濁度分布の再現が十分に言い得ないことも少なくなかった<sup>8), 9)</sup>。また、数値解析に用いる  $\Delta x$ 、 $\Delta z$  の値ならびに入力資料の時間スケールが、実際現象の時間的・空間的スケールに対して適当でない場合には、水温・濁度分布等の変化を忠実に再現することは期待できない<sup>9), 10)</sup>。しかし、この点の検討は十分でない。したがって、これらの問題点を中心に、上述の各種解析条件を水理学的ならびに実際の観

点からさらに検討すると同時に、それらをより明らかにすることが今後とも必要であろう。

本章では、これまで述べたことに基き、貯水池水理の数学モデルを実際に適用するにあたっての数値解析法とそれに必要な各種の条件について説明する。まず、このモデルの数値解法、すなわち staggerd 差分法、up-wind-difference 法、Runge-kutta 法による階差式とそれらを用いた各水理量の具体的な計算手順について説明する。ついで、数値解法に関する諸問題、とくに安定性の問題について検討し、その必要条件を明らかにする。最後に、各種解析条件、すなわち流出入に関する境界条件、大気との熱交換に関する条件、初期条件、濁質及び富栄養化関係物質の沈降速度、運動量、水温、濁度（濃度）に関する分散係数の値、 $\Delta x$ 、 $\Delta z$  といった空間的な解析スケールの値、さらには冬季における対流現象の取扱いを水理学的及び実際の観点から検討し、これらの具体的な取扱いについて述べるとともに、これらに関する現段階での問題点を明らかにする。

## 3.2. 数 値 解 析 法<sup>11)</sup>

### 3.2.1. 水温、濁度予測のための数値解析法

水温、濁度を予測するための数学モデル（2-9）～（2-13）式及び（2-20）～（2-24）式等を数値解析のための階差式に変形する方法として、プログラミングが比較的容易で、従来より二次元流れに広く用いられている staggered scheme をここでは用いることにする。

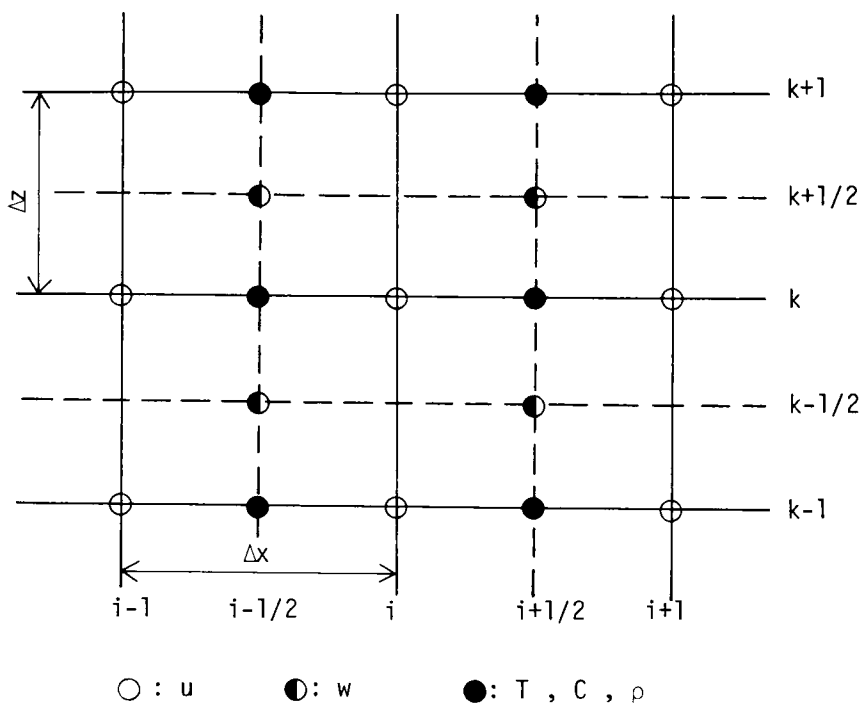
ところが、この方法では、後述する数値解の安定性に関する必要条件から、流れの計算に用いる時間間隔  $\Delta t$  が極めて小さくなるため、長時間の計算を必要とする。このため、安定性に関して最も厳しい条件が課せられる圧力項（（2-10）式の右辺第4項）だけに implicit scheme を用いて安定条件を緩和し、計算時間の短縮を図る方法もある<sup>12)</sup>。しかし、この方法は計算が繁雑となる上、長期間の計算に耐えられるほど時間が短縮されるわけではない。そこで、実用上の観点から、上述の圧力項を省略してこれに関する安定条件の制約から  $\Delta t$  を解放し、より計算時間の短縮を図る方法もある。これは流れを単純化した計算法ではあるが、長期間の解析には好都合である<sup>12)</sup>。

また、上述したいずれの数値解法においても、空間的な差分の方法には、各水理量の保存性を満たし、かつ安定な解が得られるように、流速の向きを考慮した up-wind-difference 法を用いる。

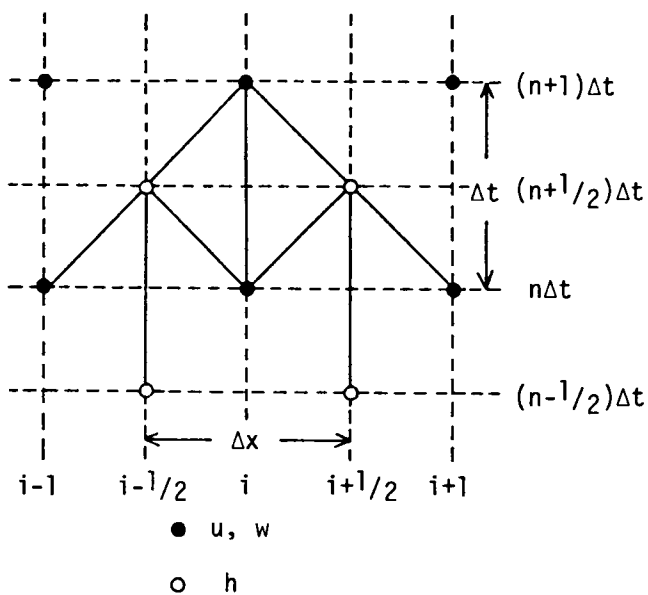
以上に述べたような数値解析法を使って、貯水池内における流れの運動、水温、濁度の変化が計算されることになるが、各計算法による階差式と具体的な計算手順は次のようである。

#### (1) staggerd sheme を用いた explicit 法（以下 explicit 法と呼ぶ）

この方法では、貯水池の流体運動を表わす流速成分  $u$ 、 $w$  及び水位  $h$  と水温  $T$ 、濁度（濃度） $c$  及び密度  $\rho$  の計算点が空間的には図-3-1、時間的には図-3-2 のように交互に配置され、これらの値を使って（2-9）～（2-13）式の数学モデルが階差式に変形される。得られる結



図一3-1 staggered scheme による計算点の空間的配置



図一3-2 Explicit法による計算点の配置

果は以下のである。(各変数の右肩に時間ステップを示す添字  $n$ , 右下に  $x$ - $z$  平面での位置を示す添字  $i, k$  を附す)

1) 水の連続式;

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i+1,k}^n B_{i+1,k} - u_{i,k}^n B_{i,k}}{\Delta x} + \frac{w_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n B_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - w_{i-\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^n B_{i-\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}}{\Delta z} \\ & + \frac{q_{b\ i+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta x \cdot \Delta z} = 0 \end{aligned} \quad (3-1)$$

2) 運動量保存式,  $x$  分値;

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i,k}^{n+1} - u_{i,k}^n}{\Delta t} = - \frac{1}{\Delta x \cdot B_{i,k}} \left( u_{i+a,k}^n \frac{u_{i,k}^n + u_{i+1,k}^n}{2} B_{i+\frac{1}{2},k} - u_{i-1+a,k}^n \frac{u_{i,k}^n + u_{i-1,k}^n}{2} B_{i-\frac{1}{2},k} \right) \\ & - \frac{1}{\Delta z \cdot B_{i,k}} (u_{i,k+a}^n w_{i,k+\frac{1}{2}}^n B_{i,k+\frac{1}{2}} - u_{i,k-1+a}^n w_{i,k-\frac{1}{2}}^n B_{i,k-\frac{1}{2}}) - \frac{1}{\Delta x \cdot \Delta z \cdot B_{i,k}} q_{b\ i,k}^n u_{b\ i,k}^n \\ & - \frac{1}{\rho} \frac{p_{i+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} B_{i+\frac{1}{2},k} - p_{i-\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} B_{i-\frac{1}{2},k}}{\Delta x \cdot B_{i,k}} \\ & + \frac{D_{mx}}{\Delta x^2 \cdot B_{i,k}} \{ (u_{i+1,k}^n - u_{i,k}^n) B_{i+\frac{1}{2},k} - (u_{i,k}^n - u_{i-1,k}^n) B_{i-\frac{1}{2},k} \} \\ & + \frac{D_{mz}}{\Delta z^2 \cdot B_{i,k}} \{ (u_{i,k+1}^n - u_{i,k}^n) B_{i,k+\frac{1}{2}} - (u_{i,k}^n - u_{i,k-1}^n) B_{i,k-\frac{1}{2}} \} \end{aligned} \quad (3-2)$$

3) 運動量保存則,  $z$  分値;

$$p_{i+\frac{1}{2},k}^{n+\frac{1}{2}} = g \left\{ \rho_{s\ i+\frac{1}{2}}^n \Delta z_{s\ i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta z \left( \sum_{k_j=k+1}^{k_s-1} \rho_{i+\frac{1}{2},k_j}^n + \frac{\rho_{i+\frac{1}{2},k}^n}{2} \right) \right\} \quad (3-3)$$

4) 水温収支則;

$$\begin{aligned} & \frac{T_{i+\frac{1}{2},k}^{n+1} - T_{i+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta t} = - \frac{1}{\Delta x \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} (T_{i+\frac{1}{2}+a,k}^n u_{i+1,k}^n B_{i+1,k} - T_{i-\frac{1}{2}+a,k}^n u_{i,k}^n B_{i,k}) \\ & - \frac{1}{\Delta z \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} (T_{i+\frac{1}{2},k+a}^n w_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n B_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - T_{i+\frac{1}{2},k-1+a}^n w_{i+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^n B_{i+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}) \\ & - \frac{1}{\Delta x \cdot \Delta z \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} q_{b\ i+\frac{1}{2},k}^n T_{b\ i+\frac{1}{2},k}^n + \frac{D_{Tx}}{\Delta x^2 \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} \{ (T_{i+\frac{3}{2},k}^n - T_{i+\frac{1}{2},k}^n) B_{i+1,k} \\ & - (T_{i+\frac{1}{2},k}^n - T_{i-\frac{1}{2},k}^n) B_{i,k} \} + \frac{D_{Tz}}{\Delta z^2 \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} \{ (T_{i+\frac{1}{2},k+1}^n - T_{i+\frac{1}{2},k}^n) B_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} \\ & - (T_{i+\frac{1}{2},k}^n - T_{i+\frac{1}{2},k-1}^n) B_{i+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}} \} \\ & - \frac{1}{\rho \cdot c_w \cdot \Delta z \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} (\phi_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n B_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - \phi_{i+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^n B_{i+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}) \end{aligned} \quad (3-4)$$

5) 濃度収支則；

$$\begin{aligned}
\frac{c_{i+\frac{1}{2},k}^{n+1} - c_{i+\frac{1}{2},k}^n}{\Delta t} = & -\frac{1}{\Delta x \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} (c_{i+\frac{1}{2},k}^n u_{i+1,k}^n B_{i+1,k} - c_{i-\frac{1}{2},k}^n u_{i,k}^n B_{i,k}) \\
& -\frac{1}{\Delta z \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} (c_{i+\frac{1}{2},k}^n w_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}}^n B_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - c_{i+\frac{1}{2},k-1}^n w_{i+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}^n B_{i+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}) \\
& -\frac{1}{\Delta x \cdot \Delta z \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} q_{b_{i+\frac{1}{2},k}}^n c_{b_{i+\frac{1}{2},k}}^n \\
& +\frac{D_{cx}}{\Delta x^2 \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} \{ (c_{i+\frac{3}{2},k}^n - c_{i+\frac{1}{2},k}^n) B_{i-1,k} - (c_{i+\frac{1}{2},k}^n - c_{i-\frac{1}{2},k}^n) B_{i,k} \} \\
& +\frac{D_{cz}}{\Delta z^2 \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} \{ (c_{i+\frac{1}{2},k+1}^n - c_{i+\frac{1}{2},k}^n) B_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - (c_{i+\frac{1}{2},k}^n - c_{i+\frac{1}{2},k-1}^n) B_{i+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}} \} \\
& -\frac{w_0}{\Delta z \cdot B_{i+\frac{1}{2},k}} (c_{i+\frac{1}{2},k+1}^n B_{i+\frac{1}{2},k+\frac{1}{2}} - c_{i+\frac{1}{2},k}^n B_{i+\frac{1}{2},k-\frac{1}{2}}) \quad (3-5)
\end{aligned}$$

各式では、分散係数及び濁度に関する沈降速度は時間的・空間的に一様として展開している。なお、これらのパラメータの取扱いについては後に詳しく説明する。また、(3-2)、(3-4)、(3-5)式における記号  $a$  は、上流側差分をとるためのもので、これが付けられた水理量に乗ぜられる流速が正ならば0、負ならば1の値をとる。

水表面を含む最上層ブロックでは、(2-20)～(2-24)式を同様に変形すればよいが、このうち水の連続式と  $x$  方向の運動量保存則について示すと、次のようである。

1) 水の連続式；

$$\begin{aligned}
\frac{\Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{1}{B_{sf_{i+\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}} \Delta x} (u_{i+1,k_s}^n \bar{B}_{s_{i+1}}^{n-\frac{1}{2}} \Delta z_{s_{i+1}}^{n-\frac{1}{2}} - u_{i,k_s}^n \bar{B}_{s_i}^{n-\frac{1}{2}} \Delta z_{s_i}^{n-\frac{1}{2}} \\
- w_{i+\frac{1}{2},k_s-\frac{1}{2}}^n A_{k_s-\frac{1}{2}} + q_{b_{s_{i+\frac{1}{2},k_s}}}^n) = 0 \quad (3-6)
\end{aligned}$$

2) 運動量保存則， $x$  分値；

$$\begin{aligned}
\frac{u_{i,k_s}^{n+1} \bar{B}_{s_i}^{n+\frac{1}{2}} \Delta z_{s_i}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,k_s}^n \bar{B}_{s_i}^{n-\frac{1}{2}} \Delta z_{s_i}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} = & -\frac{1}{\Delta x} \left\{ u_{i+a,k_s}^n \frac{u_{i,k_s}^n + u_{i+1,k_s}^n}{2} \bar{B}_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}} \Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}} \right. \\
& - u_{i-1+a,k_s}^n \frac{u_{i,k_s}^n + u_{i-1,k_s}^n}{2} \bar{B}_{s_{i-\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}} \Delta z_{s_{i-\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}} \left. \right\} + u_{i,k_s-1+a}^n w_{i,k_s-\frac{1}{2}}^n B_{i,k_s-\frac{1}{2}} \\
& - \frac{1}{\Delta x} q_{b_{i,k_s}}^n u_{b_{i,k_s}}^n - \frac{1}{\rho \Delta x} (p_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} \Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} \bar{B}_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} - p_{s_{i-\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} \Delta z_{s_{i-\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}} \bar{B}_{s_{i-\frac{1}{2}}}^{n+\frac{1}{2}}) \\
& + D_{mx} \frac{(u_{i+1,k_s}^n - u_{i,k_s}^n) \bar{B}_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}} \Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}} - (u_{i,k_s}^n - u_{i-1,k_s}^n) \bar{B}_{s_{i-\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}} \Delta z_{s_{i-\frac{1}{2}}}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}
\end{aligned}$$



$$-D_{mz} \frac{u_{i,k_s}^n - u_{i,k_s-1}^n}{\Delta z} B_{i,k_s-\frac{1}{2}} \quad (3-7)$$

ここに、 $B_{sf}$ ；水表面における貯水池幅、 $k_s$ ；最上層ブロックにおける $k$ の値、 $\bar{B}_s$ ；最上層ブロックにおける平均貯水池幅である。

以上の各階差式により、各ブロックにおける $u$ 、 $w$ 、 $T$ 、 $c$ と、水深 $h$ すなわち $\Delta z_s$ が計算されるが、その手順は次のようである。

- ① 初期値として $u^n$ 、 $w^n$ 、 $\Delta z_s^{n-\frac{1}{2}}$ 、 $T^n$ 及び $c^n$ を与える。
- ② (3-6)式より $\Delta z_s^{n+\frac{1}{2}}$ を求める。
- ③ この $\Delta z_s^{n+\frac{1}{2}}$ の値と $T^n$ 、 $c^n$ の値から(3-3)式より $p^{n+\frac{1}{2}}$ を求める。このとき、 $p^n$ の値は

$$\rho^n = \rho_T^n + 0.623 \times 10^{-6} c^n \quad (3-8)$$

で計算される。ここに $\rho_T^n$ ； $T^n$ に対する密度である。

- ④ (3-2)及び(3-7)式より $u^{n+1}$ を求める。
- ⑤ (3-1)式より $w^{n+1}$ を求める。
- ⑥ (3-4)、(3-5)式及び最上層ブロックでの水温、濁度(濃度)の計算式を用いて $T^{n+1}$ 、 $c^{n+1}$ を求める。
- ⑦ ②～⑥を所定の計算範囲でくり返す。

①～⑦の計算手順をフロー・チャートで示すと、図-3-3のようである。

(2) 圧力項に implicit scheme を用いる計算法(以下、partial implicit 法と呼ぶ)

この方法による計算点の配置は、空間的には(1)と同じであるが、時間的には図-3-4のようになる。このとき、水の連続式及び運動量保存則の階差式は、貯水池内部のブロックにおいては、(1)の(3-1)～(3-3)式で、(3-2)式の $p$ と(3-3)式の $\Delta z_s$ の時間レベルを $n+1$ としたものになる。

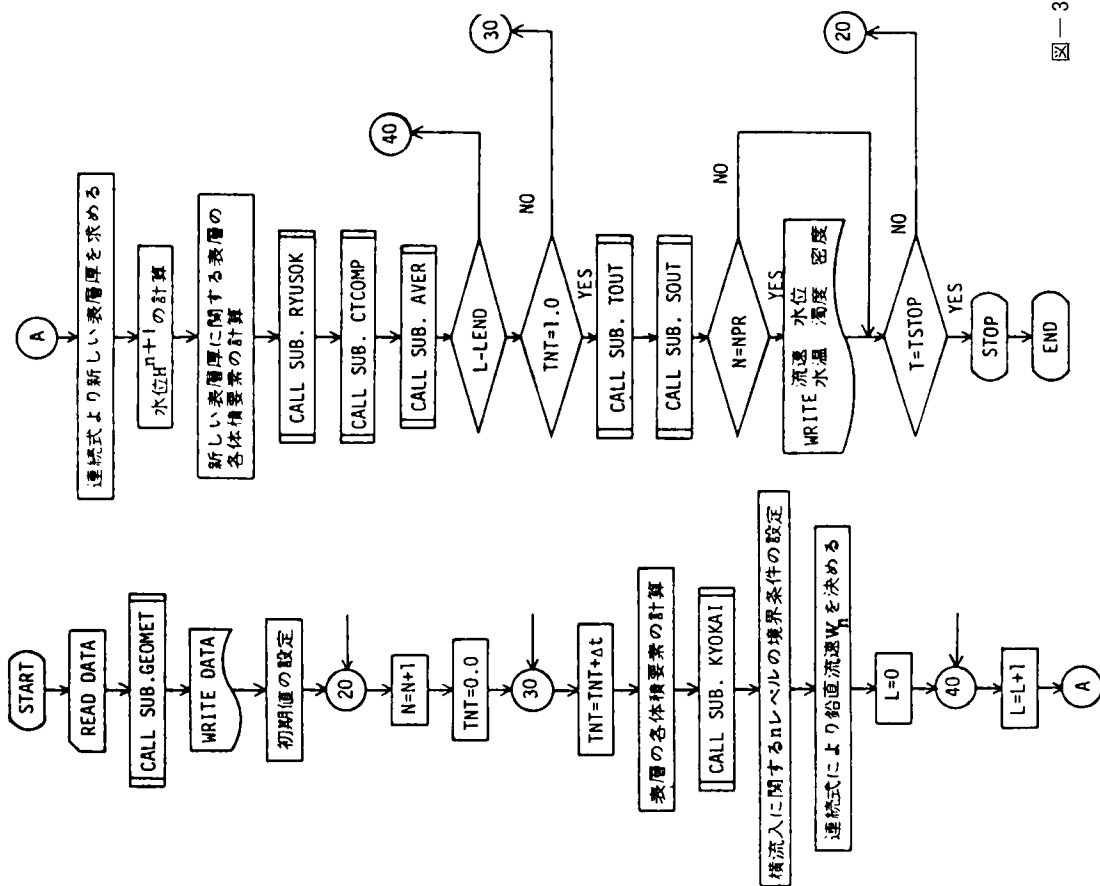
最上層のブロックでは、水の連続式が次式となる。

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n+1} - \Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^n}{\Delta t} + \frac{1}{B_{sf_{i+\frac{1}{2}}}^n \Delta x} (u_{i+1,k_s}^{n+1} \bar{B}_s^{n+1} \Delta z_{s_{i+1}}^{n+1} - u_{i,k_s}^{n+1} \bar{B}_i^{n+1} \Delta z_{s_i}^{n+1} \\ & - w_{i+\frac{1}{2},k_s}^{n+1} A_{k_s-\frac{1}{2}} + q_{b_{s,i+\frac{1}{2},k_s}}^{n+1}) = 0 \end{aligned} \quad (3-9)$$

運動量保存則 $x$ 分値については、(3-7)式において、圧力項を

$$-\frac{1}{\rho \Delta x} (p_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n+1} \Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^n \bar{B}_{s_{i+\frac{1}{2}}}^n - p_{s_{i-\frac{1}{2}}}^{n+1} \Delta z_{s_{i-\frac{1}{2}}}^n \bar{B}_{s_{i-\frac{1}{2}}}^n) \quad (3-10)$$

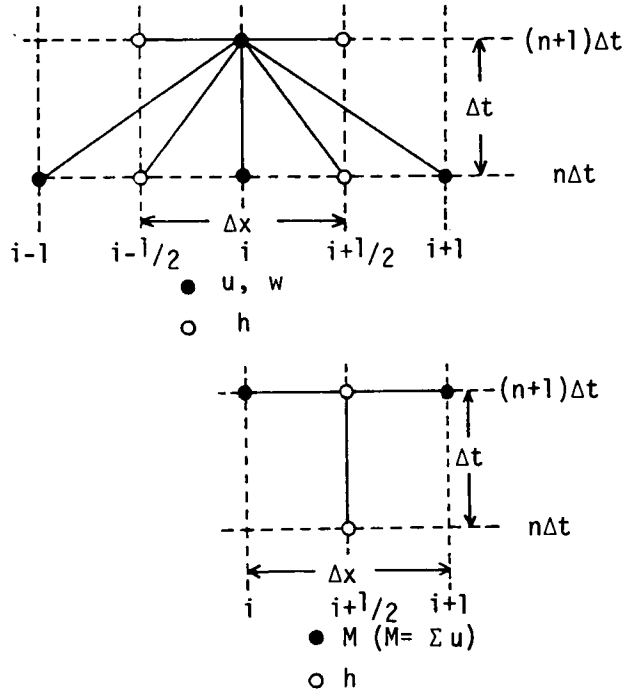
で置き換えるとともに、これ以外の各項で $\Delta z_s$ 及び $\bar{B}_s$ の時間レベル、 $n+\frac{1}{2}$ 及び $n-\frac{1}{2}$ をそれぞれ $n+1$ 、 $n$ に変えたものとなる。また、 $z$ 分値に関するものは次式で計算される。



記号	説明
N	計算日を示すパラメータ
TNT	計算時刻を示すパラメータ
Δt	計算時間間隔
LEND	流れ方向の貯水池分割数
NPR	出力日を示すパラメータ
TSTOP	計算終了時刻
n	タイムレベル

SUBROUTINE名	説明
GEOMET	各体積要素の長さ、幅、面積の計算
KYOKAI	上流端、下流端での流速分布を与える
RYUSOK	運動量保存式より流速 $U$ を計算する
CTCOMP	$n+1$ レベルの水温、濁度、密度を計算する
AVER	密度逆転層があれば平均化操作を行う
TOUT	流出水温を計算する
SOUT	流出濁度を計算する

図—3—3 Explicit法による数値計算のフローチャート



図一3-4 Partial Implicit法による計算点の配置

$$p_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n+1} = \frac{g}{2} \rho_{i+\frac{1}{2}, k_s}^n \Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n+1} \quad (3-11)$$

一方、水温、濁度に関する計算式は(1)の場合と全く同じで、(3-4)、(3-5)式がそのまま用いられる。

以上のように、この計算法では、水の連続式及び運動量保存則の階差式が、 $u^{n+1}$ 、 $w^{n+1}$ 、 $p^{n+1}$  ( $\Delta z_s^{n+1}$ ) に関する連立一次方程式に帰着され、これを解く必要が生じるため、計算は極めて複雑となる。このため、この解法にあたっては、各ブロックに対するそれぞれの階差式を、水深方向に順次加え、断面  $i$  を通過する面流量  $M_i^{n+1}$

$$M_i^{n+1} = \sum_{k=1}^{k=k_s} (u_{i,k}^{n+1} \cdot B_k \cdot \Delta z_k) \quad (3-12)$$

と  $\Delta z_{s_{i+\frac{1}{2}}}^{n+1}$  に関するものに変換することによって、まずこれらの値を求め、次に順次  $p^{n+1}$ 、 $u^{n+1}$ 、 $w^{n+1}$  を計算する方法をとる<sup>11)</sup>。

(3) 圧力項(水面勾配)を省略した簡易計算法(以下では簡便法と呼ぶ)

(1)及び(2)の計算法では、数値解法の安定条件から決まる  $\Delta t$  が、一日程度あるいはそれ以上の時間スケールで変化する現象に対しては必要以上に小さいために、こうした現象を長時間にわたって解析する場合には、計算時間の面から余り実用的とはいえない。そこで、平常時は

ほぼ水平と考えられる水面勾配を密度変化と同様に無視し、圧力項に関する安定条件を取り除いて  $\Delta t$  に課せられる制約を緩和し、計算時間の短縮を図ったものが、この計算法である。もちろん、現象をできるだけ忠実に再現するには省略しない計算をしなければならないが、この簡便法でも実用上は十分な精度が得られることがわかっている<sup>12)</sup>。

この方法による階差式は、運動量保存則及び最上層ブロックにおける水の連続式を除くと、(1)の計算法によるものと同じである。運動量保存則の階差式は  $x$  分値に関しては、(3-2) 及び(3-7) 式の圧力項（右辺第4項）を省略したものとなる。

最上層ブロックにおいては、ブロックの厚さ  $\Delta z_s^{n+1/2}$  すなわち水位が、既知量である流入、流出流量  $Q_{in}^n$ ,  $Q_{out}^n$  及び全水表面積  $A_{SUR}^n$  を用いて

$$\frac{\Delta z_{s_{i+1/2}}^{n+1/2} - \Delta z_{s_{i+1/2}}^{n-1/2}}{\Delta t} = (Q_{in}^n - Q_{out}^n) / A_{SUR}^n \quad (3-13)$$

より計算される。

また、この圧力項を省略した計算では、時間方向に計算点をずらすことなく、プログラミングがより簡単な通常の explicit 法により、図-3-5 に示すような計算格子を用いて流速分布を求めることもある<sup>13), 14)</sup>。

### 3.2.2. 富栄養化予測のための数値解析法

2.6.2. に示した貯水池における富栄養化予測のための数学モデルを数値解析するにあたっては、濃度収支則（2-30）～（2-34）式に含まれる生物学的生産・消費項の影響による解の不安定を防ぐため、この種の方程式に慣用されている Runge-kutta 法を用いて計算を進める。

この方法は、非線形な生産・消費項に起因する擾乱の成長を時間的な平均操作により抑制し、計算を安定かつ円滑に進めるためのものである。この方法による階差式は、空間的には水温、濁

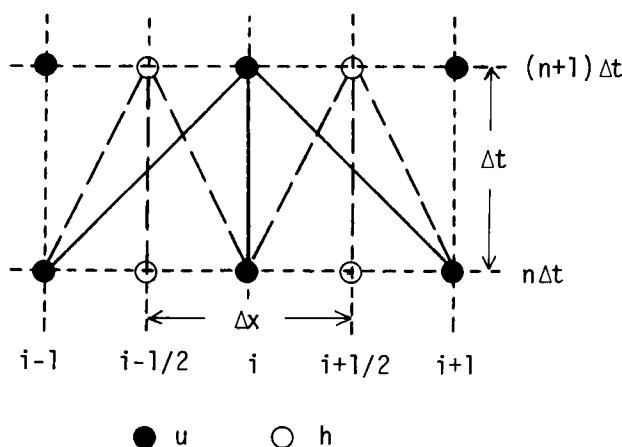


図-3-5 単純化モデルに対する Explicit 法（簡便法）の計算格子

度を予測する場合に用いる上述の(1)～(3)の方法と全く同じであるが、時間軸方向には以下の計算法がとられる。

例えば、いま濃度収支則に関する階差式(3-5)式の右辺を  $F(t^n, c^n)$  とおくと、 $c^{n+1}$  は予測子  $c^{n+1*}$  を用いて次のように計算される。

$$\left. \begin{aligned} c^{n+1*} &= c^n + \Delta t \cdot F(t^n, c^n) \\ c^{n+1} &= c^n + \frac{\Delta t}{2} \{F(t^n, c^n) + F(t^{n+1}, c^{n+1*})\} \end{aligned} \right\} (3-14)$$

ここに、 $F(t^{n+1}, c^{n+1*})$  は、 $c^{n+1*}$  を用いて計算される(3-5)式の右辺の値である。

この方法では、 $\Delta t$  だけ進むのに2ステップの計算が必要となるため、計算所要時間は通常のexplicit法より長くなる。このため、これを用いた富栄養化の数値解析では、流れを単純化した(3)の簡便法で流速を計算し、その値を用いて水温及び各種水質濃度の計算を進めることにする。生物活動による水質変化のスケール(1日当りの変化率で与えられることが多い)等を考えれば、こうした簡便法でも実用上は十分な解析が可能と考えられる。

### 3.2.3. 数値解析法に関する検討

3.1. で述べたように、数値解析を進めるにあたっては、数値解の安定性や近似精度など数値解析法に関する諸問題について事前に検討しておく必要がある。このうち、まず最も問題となる安定性に関し、上述の各計算法について検討を加え、安定性のための必要条件を求めることにする。

安定性は収束性のための必要条件である<sup>15)</sup>と同時に、實際上、計算時間間隔を直接制限することになるため、従来より多くの事例を用いて種々の議論がなされている。ところが、これらは主として線型化された初期値問題に関するもので、ここで取り扱うような非線形項を含む場合のものについては、個々の問題によって異なることなどがあって十分明らかではない。しかし、非線形項を含む場合でも、それを線形化することによって、安定性のための必要条件を考えることはできるようである。

そこで、これまでに述べた各計算法について、安定性のための必要条件を求めてみると、次のようである。

#### 1) explicit 法

まず、流速成分  $u$ ,  $w$  及び水位  $h(\Delta z_s)$  を求めるための(3-1), (3-2)及び(3-6), (3-7)式について考えると、安定性の解析はこれらを線形化した後、フーリエ級数に展開することによって行いうるが、すべての項をそのまま取り扱って必要条件を求めることは極めて困難となる。そこで、各式において、 $B$ ,  $A$ ,  $\rho$ ,  $D_{mx}$ ,  $D_{mz}$  を一定、 $q_0$  を0とするとともに、さらに a) 水深方向の移流項及び分散項を省略した場合、b) 圧力項を省略した場合の2つに分けて、安定性のための必要条件を求めてみると、Courant-Friedrichs-Lewy の条件として、それぞれ次式が得られる。

a) の場合

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} \leq \frac{2\sqrt{gh} - |u| - 2 \frac{D_{mx}}{\Delta x}}{2gh} \quad (3-15)$$

b) の場合

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta t}{\Delta x} &\leq \frac{1}{|u| + 2 \frac{D_{mx}}{\Delta x}} \\ \frac{\Delta t}{\Delta z} &\leq \frac{1}{|w| + 2 \frac{D_{mz}}{\Delta z}} \end{aligned} \right\} (3-16)$$

a), b) の場合の条件を比較すると,  $\sqrt{gh}$  に比して  $|u|$  及び  $|w|$  が十分に小さいことから, (3-15) 式の方がより厳しく, この場合の安定性の必要条件は (3-15) 式となる。

一方, 水温, 濃度 (濁度) を求めるための (3-4) 及び (3-5) 式の安定条件は (3-16) 式と同様になるが, これらの式は (3-1) ~ (3-3) 式と連立して解かねばならないため, 結局, この方法による計算の安定性に関しては, 少なくとも (3-15) 式を満足する必要がある。

## 2) partial implicit 法

1) の場合と同様に, 各計算式を線形化, 単純化して, 安定性のための必要条件を求めると次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\Delta t}{\Delta x} &\leq \frac{1}{2 \left( |u| + 2 \frac{D_{mx}}{\Delta x} \right)} - \frac{|u| + 2 \frac{D_{mx}}{\Delta x}}{2gh} \\ \frac{\Delta t}{\Delta z} &\leq \frac{1}{|w| + 2 \frac{D_{mz}}{\Delta z}} \end{aligned} \right\} (3-17)$$

最初の条件式では,  $8gh \gg |u| + 2 \frac{D_{mx}}{\Delta x}$  であり, 実質上は右辺第二項を省略したものを考えればよいが, それと次の条件式を比較した場合, いずれが厳しいものであるかは一概に言えない。したがって, この計算法の場合には, (3-17) 式のいずれの条件をも同時に満たすような  $\Delta t$  を少なくとも選ぶ必要がある。

## 3) 簡便法

この計算法の安定性に関する必要条件は, 1) の b) の場合の条件, すなわち (3-16) 式と同じものとなる。

## 4) Runge-kutta 法による濃度計算の場合

この計算法についても, これまでと同様に線形化, 単純化した後, a) 生物学的生産・消費項を省略した場合, b) この生産・消費項以外を省略した場合に分けて考えることにする。a) の場合

の必要条件は、(3-16)式と同様となるが、b)の場合の条件は次のようになる。

b)の場合、水質変化の計算式は一般に、

$$\left. \begin{aligned} c_{i,k}^{n+1*} &= c_{i,k}^n + \Delta t (\alpha_1 - \alpha_2) c_{i,k}^n \\ c_{i,k}^{n+1} &= c_{i,k}^n + \frac{\Delta t}{2} \{ (\alpha_1 - \alpha_2) c_{i,k}^n + (\alpha_1 + \alpha_2) c_{i,k}^{n+1*} \} \end{aligned} \right\} (3-18)$$

となる。ここに  $\alpha_1$  ; 生産率,  $\alpha_2$  ; 消費率である。 $\alpha_1, \alpha_2$  は実際には  $c^n$  の関数であるが、簡単のため、いまこれらを定数とし、

$$r = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta t \quad (3-19)$$

において、(3-18)式をフーリエ展開し、打ち切り誤差に関する増幅率  $\xi$  を求めると

$$\xi = 1 + r + \frac{r^2}{2} \quad (3-20)$$

となる。このため、 $r > 0$  すなわち  $\alpha_1 > \alpha_2$  の場合には、 $|\xi| > 1$  となり発散するが、解の安定性が問題となるのは  $r < 0$  ( $\alpha_1 < \alpha_2$ ) の場合であり、このときの  $|\xi| < 1$  の条件より、結局

$$\Delta t < \frac{2}{\alpha_2 - \alpha_1} \quad (3-21)$$

が安定性のための必要条件となる。

したがって、(3-16)式及び(3-21)式を同時に満たすことが、安定な計算に必要な最低限の条件となる。

以上、各計算法の安定性に関する必要条件を示したが、実際には、これらの条件式を満たすように  $\Delta t$  を決めても、非線形項による影響や、単純化したことによる影響などのために、解が不安定となったり、不安定にはならないまでも振動したりすることが少なくない。

したがって、実際の計算にあたっては、以上の各条件式を一応の目安に、その範囲内で  $\Delta t$  を変化させた計算を実施して、試行錯誤的に解の安定性を検討し、同時にそれを満たす  $\Delta t$  の値を決めていかざるを得ないであろう。

つぎに、各計算式に含まれる離散化誤差の程度、すなわち各計算式の近似精度について若干ふれておく。各計算式の近似精度は、各式を点  $(i\Delta x, k\Delta z, n\Delta t)$  について Taylor 展開することにより調べられるが、2.4.2. 及び 2.5.2. に示した数学モデルはすでにブロックに対して空間的に拡張されたものであるから、数値計算上は、 $x$  及び  $z$  方向に関する近似精度よりむしろ  $\Delta t$  に関するものが問題となろう。3.2.2. に述べた(1)~(4)の計算法では、(1)~(3)の各式は、Taylor 展開の一次の項だけをとったもので、誤差の程度が  $O(\Delta t)$  のオーダーであるのに対し、(4)の方法による計算式は2次の項までを近似したものであり、誤差は  $O(\Delta t^2)$  のオーダーである。

また、ここで取り扱うような移流分散式の数値解析では、Bella<sup>16)</sup> らにより指摘されたような数値的分散がしばしば問題とされる。一般には、こうしたみかけ上の分散効果は数値解の安定性

に寄与するものとされているが、裏を返せば、実際の分散項にそうした数値的分散項を付加した形で計算することになり、ときにはその影響によって解がゆがめられる恐れもある。しかし、ここでの解析は、空間的に拡張された平均水理量を対象とするものであるため、ある点の値を対象とした計算においてのこの問題に関する議論を当てはめてみても、余り意味がないように思われる。それより、貯水池分割法、すなわち解析に用いるコントロール・ボリュームの大きさが、現象の空間的一様性やスケールと照らし合わせたとき、それが水理学的に妥当かどうかの方が重要かつ基本的な問題であろう。

### 3.3. 環境境界条件及び初期条件の取扱い

#### 3.3.1. 流出入に関する境界条件

流出入に関する境界条件は、貯水池の上下流端及び支川流入のあるブロックの側面において与えられるが、これらは次のようである。

##### 1) 上下流端における境界条件

貯水池の上下流端では、まず、流れの挙動に関して次の条件が与えられる。

上流端；

$$\int_{A_x} u dA = Q_{in} \quad (3-22)$$

下流端；

$$\left. \begin{aligned} \sum \int_{z_m}^{z_{m+j}} b_m u dz &= Q_{out} \quad (\text{取放水口において}) \\ u &= 0 \quad (\text{ダム本体において}) \end{aligned} \right\} (3-23)$$

ここに、 $A_x$ ；上流端での流水断面積、 $b_m$ ；取（放）水口の幅、 $z_m$ 、 $z_{m+k}$ ；取（放）水口の水深方向の位置である。

上流端では、水深が浅く河道部とみなしうることから、(3-22)式の流速成分 $u$ に対して対数分布を仮定し、(3-22)式の関係を満たすように各ブロックの流入流速を与える。一方、下流端では、取（放）水口での $u$ がオリフィス型の分布、すなわち

$$u = C\sqrt{2gh} \quad (\text{ここに } C; \text{補正係数, } h; \text{水深}) \quad (3-24)$$

で近似しうるとみなし、(3-23)の関係を満たすように、各取（放）水口に関係するブロックでの流出流速を与えられた流量条件より定める。また、取（放）水口に関係しないブロックでは、流出はないものとし、 $u=0$ を与える。

上流端における水温、濁度及び各種水質濃度に関する条件は、流入河川における連続観測資料の値を用いて、水深方向に一様分布を仮定することにより与えられよう。しかし、濁度及び濃度



に関してはそうした資料が不十分な場合も多い。この場合、濁度及び濃度に関する境界条件は、それらの値と流量との関係を表す経験則として従来より慣用される次式によって与えられることが多い。

$$c = aQ_{in}^b \quad (3-25)$$

ここに、 $a$  及び  $b$  は流量と濁度（濃度）との相関関係より得られる定数である。

ところが、(3-25) 式の関係は、流域の気候、植生、土壌、岩盤などに関する地質及び地形的特徴等によって大きな時間スケールからみれば、流域固有の関係をもつと考えられるが、個々の降雨や出水についてみると、前期降雨の有無、流域の安定度、さらには人為的要因等の影響によって、一つの流域でもかなり異なった関係を示すことが少なくない。また、一つの出水に限ってみても、流量の上昇時と低減時で、濁度、濃度の挙動が異なることが、一般的に知られている。

たとえば、図-3-6 は、那賀川水系小見野々貯水池へ流入する流量と濁度の関係を、昭和49年7月～昭和53年5月の期間について調べた例<sup>17)</sup>であるが、この図より、各年毎にそれらの関係が変化していると同時に、出水の規模、すなわち流量の大小によっても、この関係が変わってく

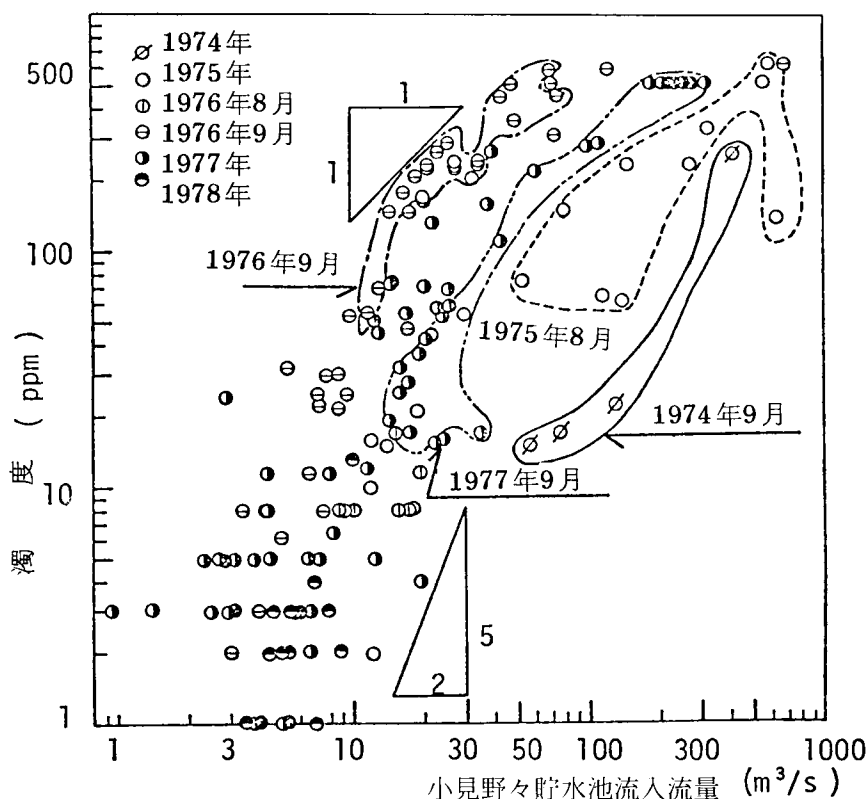


図-3-6 那賀川における流量と濁度の関係

ることがわかる。この経年変化では、昭和49年に100 m<sup>3</sup>/sec程度の流量に対し濁度が20 圃程度であったものが、昭和50年、51年にはそれぞれ同流量に対して、100 圃、500 圃程度と高くなり、52年になると300 圃程度にまで下がってきている。これは、昭和50年8月ならびに昭和51年9月の台風に伴う豪雨のために、地域内で多数の崩壊地を生じ、土砂が大量に流入した結果と考えられ<sup>18)</sup>、流域内における植生及び土砂の安定性の変化が、河川流量と濁度の関係に大きな影響を及ぼした一つの例である。

一方、流量の大小と濁度との関係については、ある流量までは濁度が流量のほぼ1.5～2.5乗に比例しているが、それを越えると濁度は流量の1.0乗に比例するような傾向がみられる。すなわち、(3-25)式の $a$ 、 $b$ の値が流量の大小により変化する。こうした変化は、濁質の流出機構の違いに起因するものと考えられるが、現段階ではその詳細は明らかでない。

したがって、比較的短い期間を対象とするときには、(3-25)式の関係を一意的なものと考ええるより、むしろ、流域内の諸条件によって変化するものとして、濁度及び濃度の境界条件を設定していく方がより現実的であろう。しかしながら、現段階においては(3-25)式の $a$ 、 $b$ の値と、流域内の諸条件及び濁度(濃度)の流出機構との関係についてはほとんど明らかにされていない。したがって、今後、この点に関しての調査研究が望まれると同時に、各水質物質の流出機構を考慮した濁度及び各種濃度の予測法の開発が一つの研究課題となるであろう。もちろん、貯水池水理における水温、濁度及び各種水質濃度の流入に関する境界条件の重要性を考えれば、これらに関する観測資料の一層の充実が望まれることはいうまでもない。

なお、富栄養化に関する水質濃度に関しては、図-3-7の例のように(3-25)式が適用できない場合もある。これは、有機態窒素及びリンなどのように、人為的要因によるものが支配的となる物質によくみられる傾向であり、この場合には、水質濃度の季節変動等の特徴からその値を推定せざるを得ないであろう。

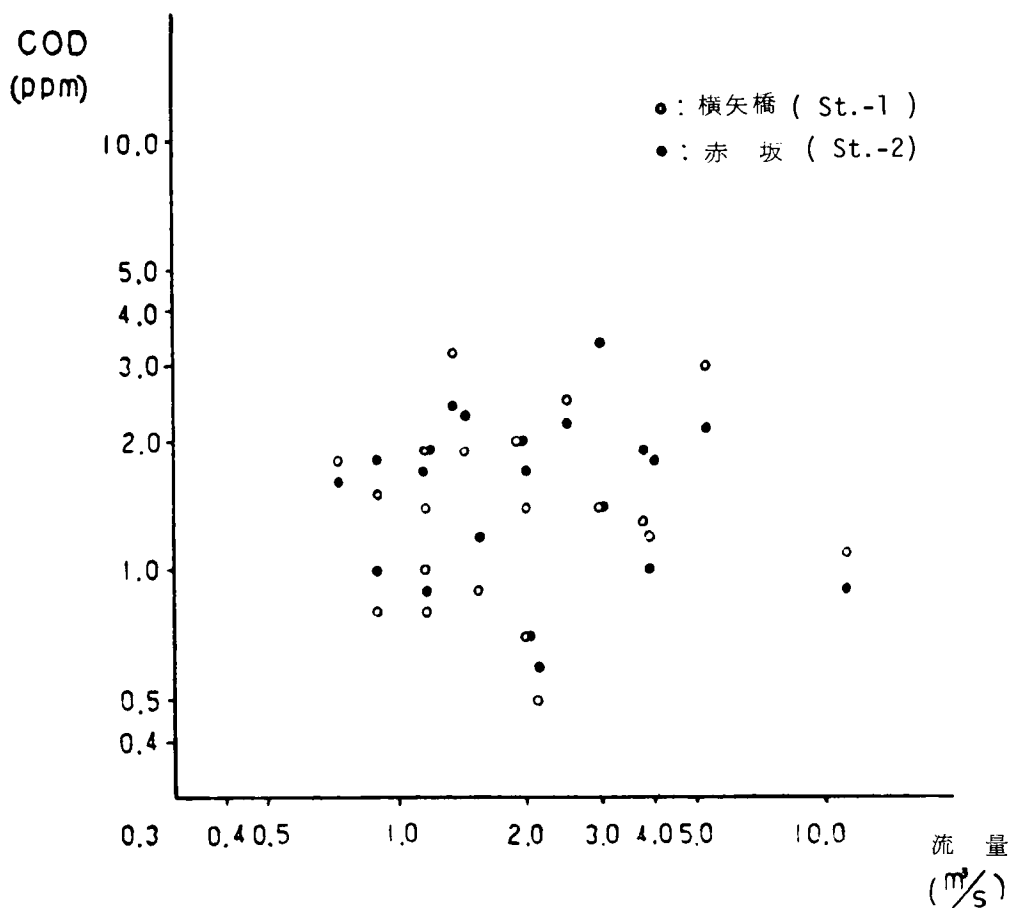
## 2) 支川流入に関する境界条件

貯水池にその影響を無視できないような支川の流入がある場合や、揚水発電あるいは利水等のために取(放)水口が設けられている場合には、これらに関する流出入条件も取り扱う必要がある。すなわち、貯水池内の各ブロック側面においては、(2-9)式等の $q_b$ に関して、

$$\left. \begin{aligned} \sum q_b &= Q_{b_{in}} && \text{(支川流入等に関係するブロック)} \\ q_b &= 0 && \text{(支川流入等がないブロック)} \end{aligned} \right\} (3-26)$$

の条件が与えられるが、 $q_b \neq 0$ の場合には、この最初の式を満たすように、支川等の流量 $Q_{b_{in}}$ が配分されなければならない。この配分は、支川流入の場合には、上述した貯水池上流端におけるときと同様であり、取(放)水口の場合には下流端におけるものと同様に行う。

また、(2-10)、(2-12)、(2-13)式等における $u_b$ 、 $T_b$ 、 $c_b$ の値は、 $u_b$ に関しては $u_b = u$ と考え、 $T_b$ 、 $c_b$ については支川水の値を水深方向に一様として与える。



図—3—7 名張川におけるCODと流量 $Q$ との関係

### 3.3.2. 大気との熱交換に関する条件

貯水池の水表面を通しての大気との熱交換には、日射による短波長輻射熱 $\phi$ 、長波長成分による大気輻射熱 $\phi_a$ 、水面からの逆輻射及び蒸発・伝導による熱損失フラックス $\phi_L$ がある。このうち、 $\phi$ 、 $\phi_a$ は貯留水に熱を供給し、 $\phi_L$ は逆に熱を奪うが、水面を通して貯留水内部にまで到達するのは $\phi$ のみである。これらの熱交換フラックスは、対象とする貯水池における実測資料に基づいて評価されるべきであるが、現実にはこれは容易なことではない。このため、従来より室内実験ならびに屋外観測に基づく種々の近似式が提案されており、実際上はそれらを用いて評価されることが多い。

ここでは、HarlemanらのM.I.T.モデルで用いられたこの種の近似式<sup>19)</sup>をそのまま用いて、上述の $\phi$ 、 $\phi_a$ 及び $\phi_L$ を与えることにする。これらの近似式では、気温、日射量（あるいは日照時間）、湿度、風速、雲量の各観測値から $\phi$ 、 $\phi_a$ 及び $\phi_L$ が計算される。このとき、いくつかの物

理定数の値が必要となるが、實際上問題となるのは、 $\phi$ に関する水面反射率、水面吸収率及び水中での減衰係数である。これらの値は、時間的、場所的に変化するため、対象とする貯水池ならびに期間毎に決める必要があるが、一つの貯水池に対しては通常一定値として取り扱われる。また、減衰係数の値は、水の透明度に関係して変化するとされているが、こうした変化も考えないことにする。

### 3.3.3. 初期条件

貯水池のような流れの場における流れの運動学的挙動に関する初期条件の設定法として確立されたものはないのが現状であろう。そこで、通常用いられる次の方法により初期値を設定する。

すなわち、出発値として  $u$ ,  $v$  の値を 0 とおき、水位  $h$  には計算開始時刻の観測値を与えた後、流入及び流出流量の値を 0 から計算開始時刻の流入流量（あるいは流出流量）の値に一致するように与え、その後それを定常に保ったまま、非定常な流速計算を継続し、各計算点における流速の数値解が、時間的に変化しなくなったとみなせる状態を初期値とする方法である。

一方、水温及び濁度（濃度）に関しては、計算開始日の実測値を与える。

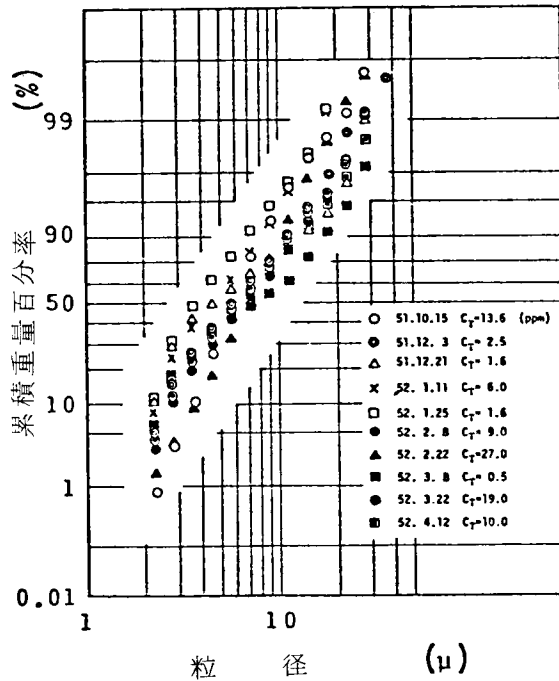
## 3.4. 各種水理条件の取扱い

### 3.4.1. 濁質の粒度分布

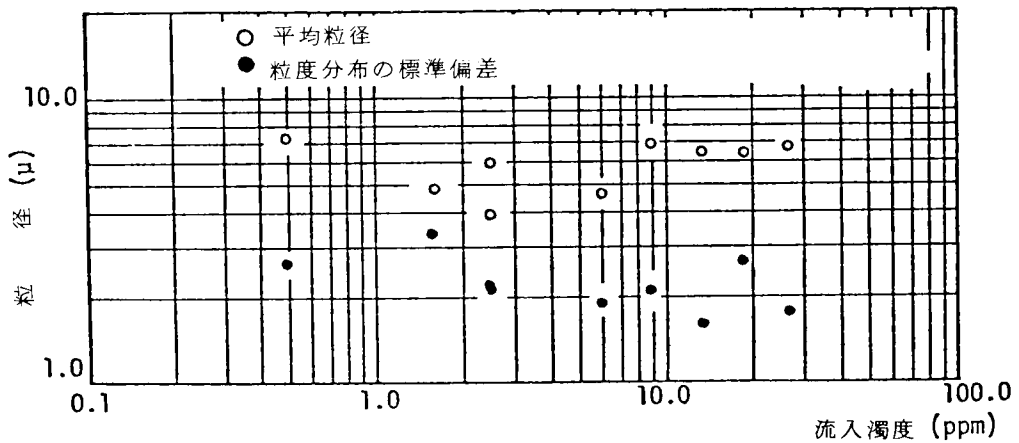
濁度は水の濁りの程度を表わす水質指標であり、水中に浮遊する種々の無機性及び有機性物質に起因している。しかしながら、洪水時及びその後の期間における濁水長期化現象で問題となるのは、主として微細な粘土鉱物によるものであり、濁度はこれらの濃度と考えても差し支えない。

この粘土鉱物は、形状や密度が異なる様々な鉱物より構成されているが、これまでの調査によると、同一の水系ではふつう同じ鉱物組成を示し、またその重量比も同じで、それらは洪水時と平常時で変わらないとされている<sup>20)</sup>。しかし、これらの濁質の粒度分布は、洪水時と平常時で異なるのがふつうで、一般的には洪水時の方が大きな粒径のものを含む割合が高く、流量及び濁度のピーク時にその傾向が最も顕著であるとされている<sup>21)</sup>。

図-3-8は吉野川水系早明浦貯水池において、昭和51年10月～昭和52年4月の期間に流入した濁質の粒度分布のいくつかを対数確率紙上に図示したものである。この図では、各資料より得られた粒度分布がほぼ対数正規分布に従うことが示されているが、50%粒径や各点を連ねた直線の傾き（標準偏差に関係する）は各資料毎に異なっている。この50%粒径及び標準偏差と流入濁度との関係を調べてみると図-3-9のようになり、濁度が高いほど50%粒径は大きくなり、一方、標準偏差は小さくなる傾向がみられる。この傾向はそれほど顕著なものではなく、さらに多くの資料により検討されなければならないことはいうまでもないが、上述したような粒度分布変化の特徴を示す一つの例といえよう。



図一 3—8 早明浦貯水池への流入濁質の粒度分布



図一 3—9 流入濁質の50%粒径及び標準偏差と濁度との関係

洪水時における流入濁質の粒度分布に関するこうした傾向は、中村・足立<sup>21)</sup>によっても報告されているが、一方では、宮永・安芸ら<sup>22)</sup>の調査結果のように、濁度の増大とともに50%粒径が小さくなり、濁度の減少とともに徐々に大きくなるという、これまで述べてきたものとは全く逆の傾向を示す結果も報告されている。宮永・安芸らの調査は採水資料を15分間静置した後の上澄み

液を対象としたものであるため、そうした操作をしない資料を調べた著者及び中村らの結果とは単純に比較できないが、対象流域における濁質の主成分及びその存在状態や、前期降雨の有無さらには流域での流出特性の相違などにより粒度分布の変動特性は異なってくるようである。

いずれにせよ、貯水池へ流入する濁質の粒度分布が流量及び濁度と密接に関係して変化することには変りがない。しかし、これらの関係は現在のところ十分に明らかでなく、今後ともなお一層の調査研究が必要であろう。

濁質粒度分布の変化は、これまで述べてきたような流入濁質に関するものばかりでなく、貯水池内に存在するものについてももちろんみられる。例えば、図-3-10は、早明浦貯水池における各地点の濁質粒度分布の一例を示しているが、これから、貯水池内では濁質の約90%以上が $10\mu$ 以下の微細粒子より構成されていることとともに、上流から下流へいくにつれて、粒径が徐々に細くなり、一方、水深が深くなるにつれて粗くなる傾向があることがわかる。こうした傾向は、他の貯水池における調査報告でも指摘されており<sup>21), 23)</sup>、粒径の違いによる沈降速度の差を反映した一般的な傾向と考えてよいであろう。もちろん、洪水時ならびにその直後のように、濁質の沈降が流れの影響により阻害されて余り進まないときには、これと異なった分布傾向を示す場合もあり<sup>21)</sup>、また、濁質の電気化学的性質によっては、凝集沈降が生ずることも考えられるため、貯水池内に存在する濁質の粒度分布特性を一概に論ずることはできないが、いずれにせよ、粒度分布特性が濁質の沈降特性の差となって現われることは十分考慮しておく必要がある。

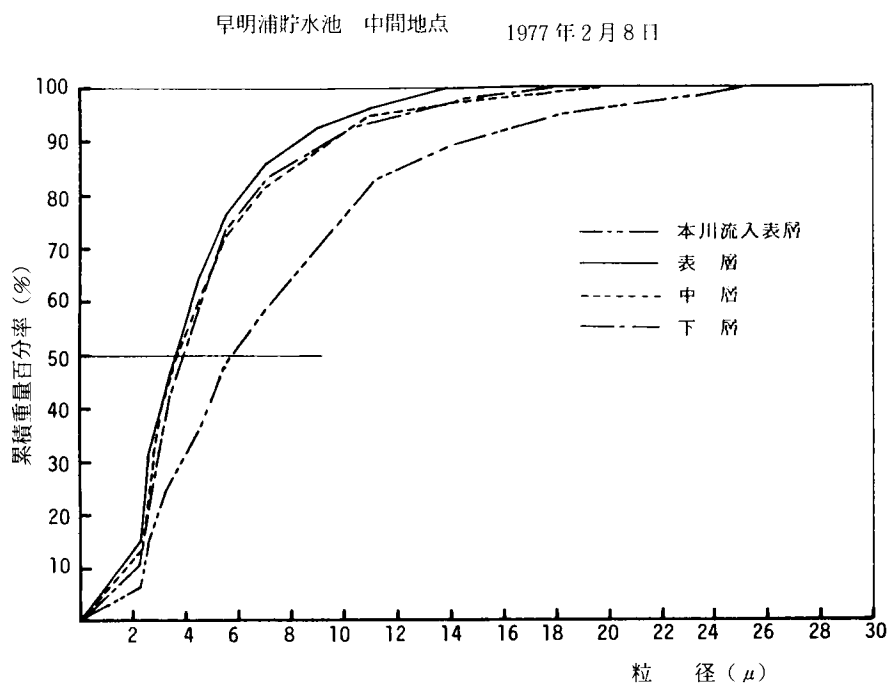
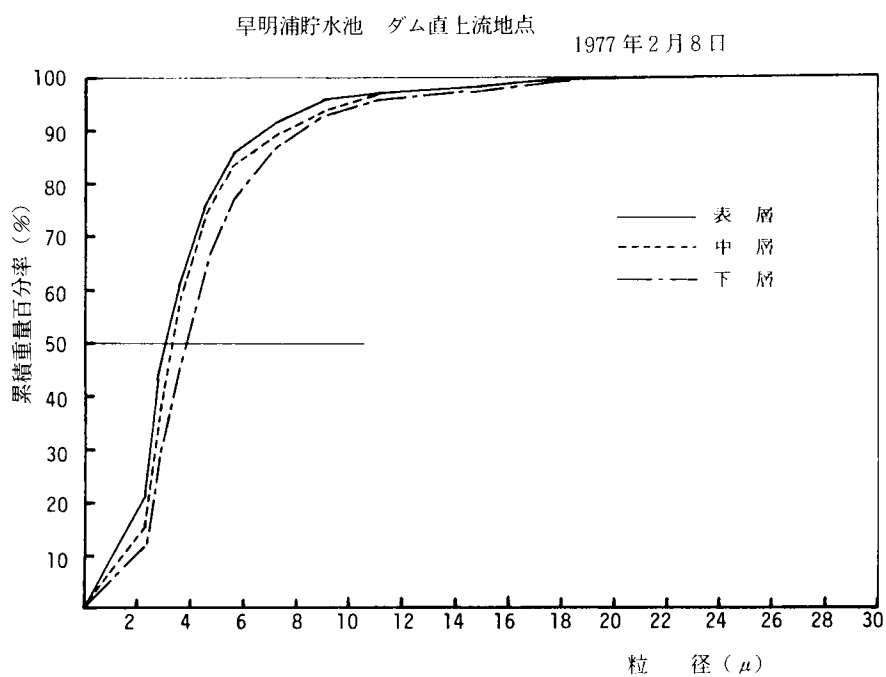
したがって、貯水池内における現実の濁度変化を追跡し、その分布を忠実に再現するには、以上に述べたような流入濁質及び池水中の濁質の粒度分布を考慮した濁度計算を実施しなければならない。こうした取扱いは、すでに著者<sup>23)</sup>ら、ならびに中村・足立<sup>21)</sup>により、それぞれ貯留水濁度あるいは流入水濁度の値に応じて平均粒径を変化させる方法を用いて試みられており、実際の濁度変化の再現に対するそれらの有効性が実証されている。しかし、これらの方法はあくまでも便宜的なもので、各粒径毎に異なる濁質の挙動を忠実に追跡しているわけではない。すなわち、現実の濁質の挙動をより忠実に取り扱うためには、各粒径毎にその挙動を追跡し、それらを合わせて全体の挙動を知るようにしなければならない。こうした観点から、ここでは以下のような方法で濁度計算を進める。

いま、様々な粒径のものから構成される濁質を、粒径別にいくつかのグループに分けたとき、各グループに属する濁質が濁度 $c$ に寄与する割合は、それらの粒度分布密度に等しいとすると、各グループの濁質の寄与による濁度 $c_m$ 及び濁度 $c$ は次のように表わされる。

$$c_m = \gamma_m \cdot c \quad (3-27)$$

$$c = \sum_m c_m \quad (3-28)$$

ここに、 $\gamma_m$ ；各粒径グループに対する粒度分布密度である。各 $c_m$ の変化は、それぞれ独立であると考えてよいから、各 $c_m$ について濁度収支則（2-13）式（もちろん $S=0$ としたもの）等



図一3-10 早明浦貯水池内における濁質の粒度分布

を適用し、(3-5)式等を使ってそれを個々に計算した後、(3-28)式の関係を用いると、 $c_m$ の重ね合わせとしての濁度 $c$ が求まることになる。このとき各グループの濁質沈降速度は、Stokesの式を用いて計算されるそれぞれの平均粒径に対する値を用いる。

この方法では、上流端における境界条件として、流入濁度の値とともに、各粒径グループに対する $r_m$ の値を与える必要がある。しかし、現実にはこれに関する資料は極めて少なく、対象とする計算期間の全範囲にわたってこれを与えることは事実上不可能である。このため、現段階では、先に述べたような濁度あるいは流量と50%粒径及び粒度分布の標準偏差などとの関係から、各 $r_m$ の値を推定せざるを得ないであろう。

### 3.4.2. 分散係数

貯水池内における運動量、水温及び濃度に関する分散係数の値とその分布は、水温、濁度及び各種水質濃度の分布を明らかにする上で重要な基本的研究課題の一つである。分散係数は、貯水池内の流れが極めて緩慢な運動をもつにもかかわらず十分に乱流状態であることから、主として乱流による拡散係数の空間的平均量と考えられるが、実測が不可能な今日では、その詳細はほとんど明らかでない。このため、従来より実際の解析にあたっては、これを一定値として取り扱い、その値を試行錯誤的に決定することも少なくない。しかし、こうした取扱いでは洪水時などにおける実際現象の再現は余り期待できない<sup>14)</sup>。

そこで、ここでは、各分散係数について Reynolds 相似が適用され、その値は空間的に一様で、流量の一次関数で表わされると仮定し、便宜的に次式で与えることにする<sup>14)</sup>。

$$D_{mx} = D_{mz} = D_{Tx} = D_{Tz} = D_{Cx} = D_{Cz} = \alpha_D \cdot Q \quad (3-29)$$

ここに、 $\alpha_D$ ；定数、 $Q$ ；流入（あるいは流出）流量である。この仮定やそれに基く分散係数値は著者らの多くの現場実測値との比較研究により、実際上有用であることがわかっている。

とくに、わが国の貯水池においては、その規模や河川流況より、移流項に比して分散項が小さいため、(3-29)式のような大胆な仮定でも実際上問題となることは少ない。しかし、貯水池内の拡散係数に関する従来の研究によると、夏期に安定な水温成層が存在するような場合には、変水層におけるその値が表水層のものに比べ極めて小さく、また、そうした成層流の場における拡散係数値は単位幅流量に比例し、かつ内部フルード数の値と正の相関をもつとされている<sup>24)</sup>。さらに、濁度分布に関しては乱れが濁質の沈降を阻害するという指摘もある<sup>25)</sup>。したがって、こうした乱流による拡散係数、さらには分散係数の時間的・空間的特性を明らかにし、その値を正しく評価しておくことが重要であることに変わりなく、今後ともより一層の調査研究が必要であろう。



### 3.4.3. 対 流 混 合

水深方向の運動に関しては、その流速成分が流れ方向のものに比べて極めて小さく、それによる加速度は重力によるものに比して無視しうる。すなわち、静水圧分布が十分に認められるものである。ところが、秋から冬にかけてのいわゆる循環期には、水表面からの冷却により不安定な密度分布を生じたときなどに、対流による貯留水の混合現象が生起し、水温及び濃度分布が一様化するようになる。この対流による貯留水の運動に関しては、密度差と流れとの関係や流れの時間的・空間的スケールなど、観測すら困難な今日ではほとんど明らかにされえず、頭のなかで現実の姿を適当にモデル化して実際の現象を説明しているに過ぎない。

このため、従来より、この対流による混合現象を取り扱う必要がある場合には、次のような便宜的方法がとられてきた<sup>19)</sup>。これは、計算上水深方向に不安定な密度勾配を生じたときには、その部分の水温及び濁度を水深方向に平均化し、密度勾配を安定なものにすることによって、不明確な対流混合現象の説明に代えるというものである。こうした取扱いが水理学的に妥当かどうかは今後の研究課題であるが、経験的には、実用上支障がないことがわかっており、ここでもこれに従うことにする。

### 3.5. コントロール・ボリュームの $\Delta x$ , $\Delta z$ の値

貯水池の解析に用いるコントロール・ボリュームの大きさ、すなわち 2.5. の図-2-1 に示したブロックの大きさは、水温、濁度及び富栄養化関係水質濃度の空間的分布の一様性やそのスケールに基いて決められなければならない。たとえば、夏季水温成層が発達した貯水池においては、水温分布はほぼ水平であり、しかも時間的な変化も比較的緩やかであるため、水深方向に 1 ~ 2 m の厚さで分割した水平層を考えれば、その一様性はほぼ満足される。ところが、洪水時及びその後の濁水現象では、しばしば濁水塊が形成され流下することがあり、その大きさや伝播速度を考えると、水深方向に 1 m 以下、流下方向には 100 m 程度あるいはそれ以下に貯水池を分割しなければならないケースもある<sup>26)</sup>。また、水温成層の破壊や富栄養化過程でのプランクトンの異常増殖なども時間的・空間的スケールの小さな現象であり、これらの解析においても、濁水塊を対象とするとときと同程度かあるいはさらに細かい三次元的分割を必要とすることがある。

しかし、既存の実測資料は、水深方向に 1 ~ 数 m、流れ方向に 1 ~ 数 km といった比較的粗い間隔で測られたものが多く、それから得られる水温、濁度等の分布が、実際現象の空間的一様性やそのスケールを正しく表わしうるものかどうかについては疑問が残る。また、各水理量の空間的一様性やそのスケールは、各種の環境境界条件ならびに貯水池規模・幾何形状等の貯水池形態要素、さらにはそれらに関する貯留水の運動学的挙動とその大きさなど、多くの要素に関連し、場所的にも時間的にも異なるため、それらを一概に決めることはできない。

このために、水温成層の形成過程を対象とするような場合はともかくとして、濁水現象や富栄養化現象を対象とするときには、コントロール・ボリュームの大きさをどの程度にすれば水理学的に妥当であるかは容易に決められないのが現状である。

数値解析に用いる  $\Delta x$  及び  $\Delta z$  の値は、基本的には、以上に述べたような水理学的意味でのコントロール・ボリュームの大きさに基いて決めなければならない。もちろんその他に、 $\Delta x$  及び  $\Delta z$  に関する数値計算上の問題として、数値解の安定性、近似精度及び分解能といったものがあるが、安定性に関しては、 $\Delta x$  及び  $\Delta z$  の値が決まれば計算時間間隔  $\Delta t$  を安定条件を満たすように調整することによって保障される。一方、近似精度及び分解能については一般に、 $\Delta x$ 、 $\Delta z$  の値を小さくすればするほど誤差は小さくなり、分解能は高くなるとされている。しかし、 $\Delta x$ 、 $\Delta z$  の値を小さくすれば、上述した安定条件の制約により、計算時間は長くなり実用性は損なわれる。また、空間的に一様な範囲をいくら細分しても、現象の再現精度が上がるわけではない。すなわち、コントロール・ボリューム内での平均量を対象とする解析においては、その平均量の対象範囲としての  $\Delta x$ 、 $\Delta z$  の値が一次的に重要であり、数値計算上の問題は二次的なものに過ぎないと思われる。

しかしながら、前にも述べたように詳細な観測資料が乏しい現状では、そうした対象範囲としての  $\Delta x$ 、 $\Delta z$  の値をすべての対象空間及び期間について求めることは困難であり、またその妥当性の評価も容易ではない。さらに、実用面を考えれば、一時的または局所的なスケールの小さな現象に合わせて、対象とする計算範囲のすべてを小さな  $\Delta x$ 、 $\Delta z$  の値で解析することは極めて非効率であると同時に、そうしたスケールの小さな現象を詳しく知る必要がないことも多い。

したがって、数値解析に用いる  $\Delta x$ 、 $\Delta z$  の値を決めるにあたっては、計算結果の現象再現精度と計算時間との兼ね合いから、実用上の有効性に基く評価が考えられてもよいであろう。こうした値の検討例は、次章において述べるが、著者らのこれまでの経験によれば、 $\Delta z$  として 1～2 m、 $\Delta x$  として 500～1000 m 程度にとれば、所要の実用再現精度が得られており、これらの値が一応の目安になろう。

## 参 考 文 献

- 1) 井上和也；開水路流れの数値解析；1980年度水工学に関する夏期研修会講義集，80-A-6，1980．
- 2) 伊藤剛編；数値解析の応用と基礎，アテネ出版，1971，pp. 197～222．
- 3) 余越正一郎・富所五郎；風による諏訪湖の流動特性，土木学会論文報告集，No. 276，1978，pp. 53～64．
- 4) 長内進・岩佐義朗・井上和也；特性曲線法による平面流れの解析，第35回年次学術講演会講演概要集第Ⅱ部，1980，pp. 490～491．

- 5) Ryan, P.J. and Harleman, D.R.F.; Prediction of the Annual Cycle of Temperature Changes in a Stratified Lake or Reservoir, Mathematical Model and User's Manual, M.I.T. Report, No.137, 1971.
- 6) Ditoro, D.M., O'Connor, D.J., and Thomann, R.V.; A Dynamic model of phytoplankton population in the Sacramento-San Joaquin Delta, Advances in Chemistry Series, Vol.106, 1971, pp.131~180.
- 7) 例えば前出の2),あるいは, Smith, G.D., 藤川洋一郎訳; 電算機による偏微分方程式の解法, サイエンス社, 1974, pp. 57~93.
- 8) 例えば, 白砂孝夫・安芸周一; 貯水池水温・濁度の予測手法とその適用例, 第21回水理講演会論文集, 1977, pp. 45~50.
- 9) 岩佐義朗・松尾直規・井上素行; 貯水池における濁度解析について, 京都大学防災研究所年報第21号-B, 1978, pp. 319~329.
- 10) 岩佐義朗; ダム貯水池における水理特性, 建設省河川局編日本河川水質年鑑, 研究編, 山海堂, 1977, pp. 797~815.
- 11) 岩佐義朗・松尾直規・俞朝夫; 貯水池水理の数値解析法とその適用について, 京都大学防災研究所年報第22号-B, 1979, pp. 341~354.
- 12) 松尾直規・岩佐義朗; 貯水池における水理特性の変化とその予測, 第24回水理講演会論文集, 1980, pp. 251~258.
- 13) 前出の9).
- 14) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭; 洪水時における貯水池の成層破壊について, 京都大学防災研究所年報第20号-B, 1977, pp. 259~270.
- 15) 野木達夫; 差分法の安定性, 土木学会編, 土木工学における数値解析, 基礎編, サイエンス社, 1974, pp. 66~92.
- 16) Bella, D.A. and Dobbins, W.E.; Difference modeling of stream pollution, Jour. of Sanitary Engineering Div. ASCE, Vol.94, No.SA5, 1968, pp.995~1016.
- 17) 岩佐義朗・綾史郎・松尾直規; 那賀川における濁質流出の特性, 第16回自然災害科学総合シンポジウム講演論文集, 1979, pp. 203~204.
- 18) 芦田和男; 流域の土砂生産と濁水源, 徳島県那賀川河口養殖ヒトエグサ等被害原因調査報告書, 1977, pp.133~158.
- 19) 前出の5)
- 20) 吉野川水系濁水調査委員会; 吉野川水系濁水調査専門委員会報告書, 1980.
- 21) 中村俊六・足立昭平; 濁水化貯水池における濁質粒度の変動, 土木学会論文報告集, 第279号, 1978, pp. 61~68.
- 22) 宮永洋一・安芸周一・秋元保・斉藤茂; 貯水池内における濁度および栄養塩の挙動の数値解

- 析，第22回水理講演会論文集，1978，pp.119～124.
- 23) 徳島県・防災研究協会；那賀川濁度追跡調査業務報告書，1978.
- 24) 江頭進治・芦田和男；密度成層流の流れの構造に関する研究，京大防災研究所年報，第22号B，1979，pp.355～381.
- 25) 安芸周一・白砂孝夫；貯水池濁水現象の調査と解析（その1）――貯水池の流動形態と濁水現象――，電力中央研究所報告74505，1974.
- 26) 松尾直規・岩佐義朗・小林正典・川那部嘉彦；貯水池水理の空間的スケールからみた解析法の考察，第25回水理講演会論文集，1981，pp.609～616.

## 第4章 貯水池における水温、濁度の予測

### 4.1. 概 説

実際の貯水池における水温予測，具体的には，貯水池内の水温分布の変化，とくに水温成層の発達過程及び消滅過程の予測，ならびにそれらを反映した流出水温の予測は，冷水問題ばかりでなく，濁水長期化，富栄養化現象の解明，さらには各課題に対する各種工学的対策の効果を評価し，最良の対策を樹立していく上で，極めて重要である。また，洪水時及びその後における貯水池内の濁度分布ならびに流出濁度の予測は，貯水池内での濁水現象の解明，下流河川での濁水予測，さらにはそれらに対する技術的対策を樹立する上での貴重な情報を提供するものとして期待される。

ところで，こうした予測は，現実の諸条件のもとで，できるだけ現実に近い姿を再現することが要求される。そのためにはまず，1.3.及び1.4.で述べたように互いに影響を及ぼし合う水温及び濁度の挙動を同時に取り扱うことが必要になる。そうでなければ，実際現象の忠実な再現は余り期待できないことになる。これは，富栄養化関連の各種水質濃度についても同様である。

次に，実際の貯水池においては，貯水池の規模及び幾何形状や，流域の諸特性，流入支川の有無，貯水池操作条件などの各種環境境界条件が，水温，濁度の変化に複雑な影響を及ぼす。したがって，その予測にあたっては，これらの現実の諸条件をできるだけ忠実に導入し，対象とする貯水池の実状に応じた取扱いを実施して，それらの影響を明らかにすることが必要である。

以上の観点より，第2章において，貯水池の水温，濁度を予測するための数学モデルが開発され，第3章ではその数値解析法ならびに現実の諸条件の取扱いが検討された。

本章では，これらの成果を用いて，実際のいくつかの貯水池において実施された水温，濁度の予測例を検討する。すなわち，数値解析法及び諸条件の妥当性の検証を含め，予測モデルの適用性を種々の観点より考察する。

### 4.2. 対象貯水池における入力資料及び解析条件

ここに述べる数値解析例は，四国地方吉野川水系早明浦貯水池ならびに那賀川水系小見野々，長安口，川口貯水池を対象としたものである。以下に各貯水池の概要，ならびに入力資料，解析条件を示す。

#### 1) 早明浦貯水池

早明浦貯水池は，図－4－1に示すように<sup>1)</sup>，四国中央部をおおむね西から東へ向かって流れ紀伊水道に注ぐ四国最大の河川吉野川の上流域に位置し，総貯水容量3.16億 $\text{m}^3$ を有する流域最大



規模の多目的貯水池である。

吉野川流域は東西に走る3本の大構造線に狭まれ、流域山地は破碎、風化が著しく、また崩壊、地すべり地帯が分布しているという地質構造の特徴をもつと同時に、日本有数の多雨地帯で、年間降雨量3000mmに達する所もあり、その大部分は夏期の台風に由来するという水文的特徴もあわせて有している。こうした吉野川の上流域に位置する早明浦貯水池は早明浦ダム地点での流域面積が417km<sup>2</sup>であり、平年の総流出量は9.5億m<sup>3</sup>程度で、このうち洪水流出によるものが1/3～2/3を占め、年間総流出量も出水の発生に影響を受けて変動が大きい。しかし、3.16億m<sup>3</sup>という膨大な貯水容量をもつため、年間の水位変化は他の多目的貯水池に比べ比較的小さく、1.2.で述べた平均年回転率 $\alpha$ は通常2～5の範囲にあり、4月～9月にかけて安定した水温成層が形成される典型的な成層型貯水池である。

早明浦貯水池の諸元は表-4-1に示すようであり、図-4-2及び図-4-3に示すような平面形状と縦断面形状をもっている。貯水池にはいくつかの支川が流入しているが、なかでも瀬戸川及び大北川はその影響を無視できないほどのものである。また、図-4-2に示すような地点で水温、濁度の観測が行われている。早明浦ダムにおいては、常時、水深4mの位置から表層取水が行われており、洪水時には、図-4-3に示すクレストゲートを使って貯留水の放流操作が実施される。

早明浦貯水池においては、昭和51年9月の台風17号に伴う記録的な降雨、出水によって、極めて多量の濁度物質が流入し、洪水後も長期間にわたって貯留されるいわゆる典型的な濁水長期

表-4-1 早明浦貯水池諸元

項 目	諸 元 値
ダ ム 高	106 m
直 接 集 水 面 積	417 km <sup>2</sup>
間 接 〃	汗 見 川 55 km <sup>2</sup>
分 水 流 域 面 積	長 沢 ダ ム 70 km <sup>2</sup> 瀬戸川・計画 53.7 km <sup>2</sup>
貯 水 池 面 積	7.5 km <sup>2</sup>
総 貯 水 容 量	316,000×10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> (サーチャージ水位 EL 343.00)
常 時 満 水 位 容 量	236,000 〃 (常時満水位 EL 331.00)
夏 期 制 限 水 位 容 量 (7月1日～10月10日)	226,000 〃 (制 限 水 位 EL 329.50)
洪 水 調 節 容 量	90,000 〃 (EL 329.50～EL 343.00)
サーチャージ容量	80,000 〃 (EL 331.00～EL 343.00)
総 利 水 容 量	209,000 〃 (EL 275.00～EL 331.00)
堆 砂 + 死 水 容 量	27,000 〃 (低水位 EL 275.00)
計 画 高 水 流 量	4,700 m <sup>3</sup> /s
発 電 使 用 水 量	最 大 65 m <sup>3</sup> /s

化現象が観測された。本章では、この昭和51年の1月1日～12月31日までの1年間を対象とした解析例について述べる。

この解析に用いた入力資料及び計算条件は表-4-2に示すようである。表-4-2において、本川の流入流量は貯水池上流端での境界条件として与えるが、支川大北川、瀬戸川の流量及びダム下流に位置する汗見川からの取水流量は、横流入流量として取り扱う。また、洪水期間における流入濁度の推定式は既存の実測資料より得られた流量-濁度の関係に基づくものである。

なお、初期条件は3.3.3.で述べたような方法で流速の初期値を設定するとともに、水温及び濁度に関しては、昭和51年1月1日が欠測日のため、最寄りの同年1月5日の実測値を与えている。

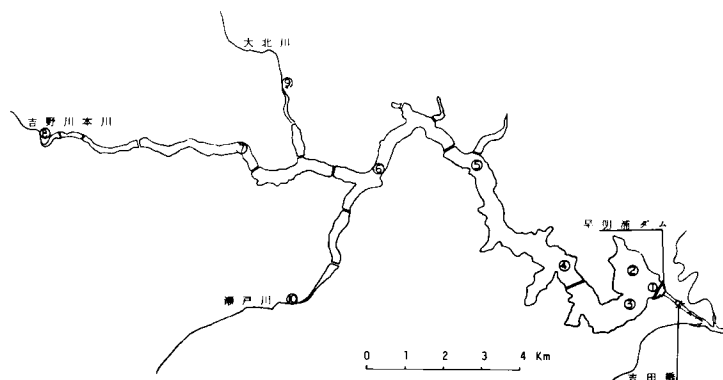


図-4-2 早明浦貯水池平面形状ならびに濁度測点

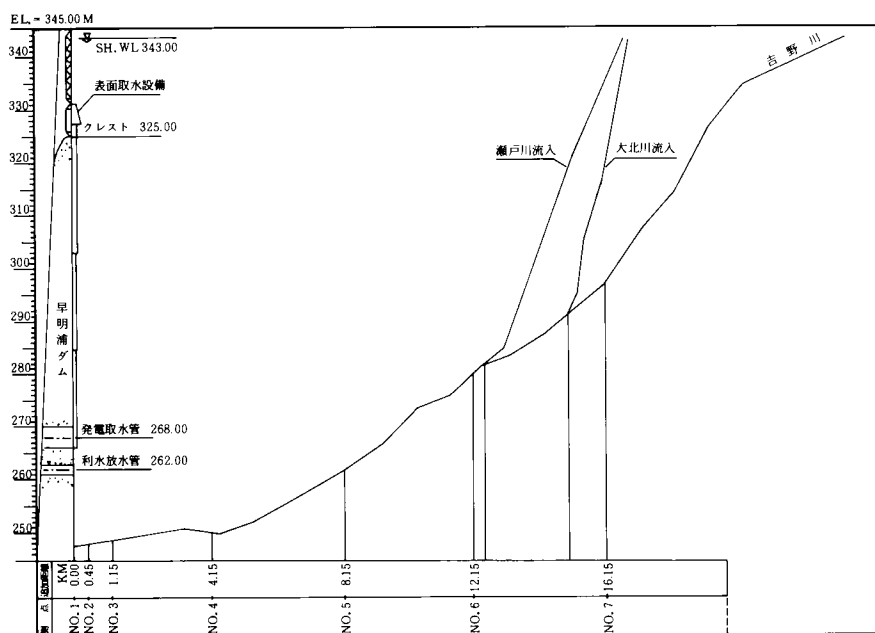


図-4-3 早明浦貯水池の縦断面図



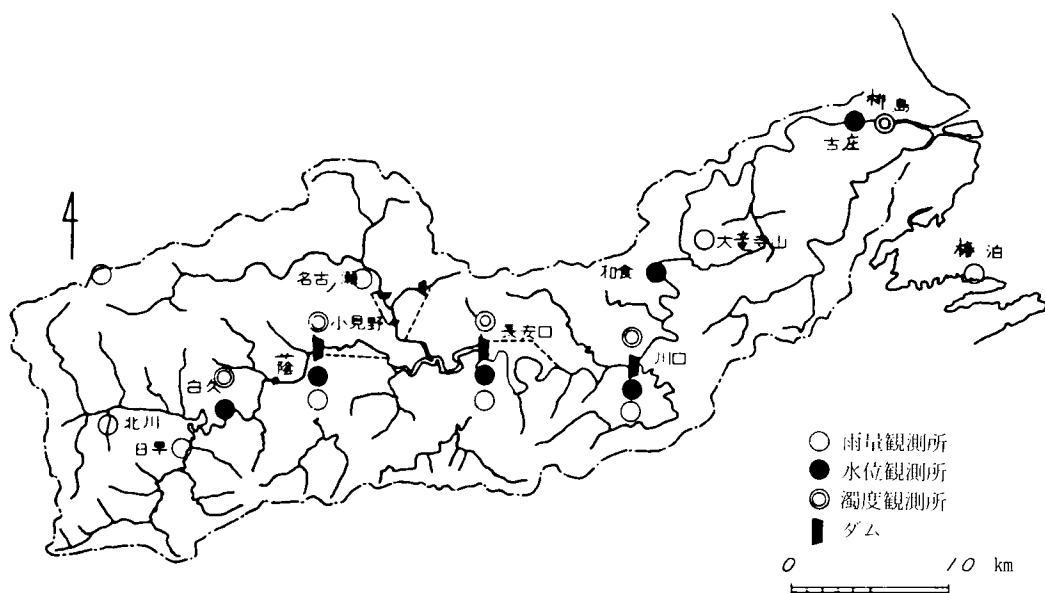
表－４－２ 早明浦貯水池における水理解析条件及び入力資料

項	目	項	目
1.	計算対象流況 S 51. 1. 1～S 51. 12. 31		間推定、汗見取水の水温は大北川のものに等しいとした。
2.	貯水池形状 ・各標高の平面積及び湛水長は図面計測	8.	流入濁度 ・平常時は本川、支川ごとに実測値を用い、欠測値は補間推定。ただし、洪水時は、資料欠測のため、次式で推定した。 本川 $C = 0.25 Q^{1.0}$ 支川 $C = 1.00 Q^{1.0}$ ここに、 $C$ : 流入濁度 (ppm) $Q$ : 流入流量 (m <sup>3</sup> /sec) なお、汗見取水の濁度は大北川のものに等しいとした。
3.	気象 ・気温、日射量、湿度、風速、雲量 ・ダムにおける観測値および高知気象台の資料で、毎日の日平均値。	9.	その他の条件 運動量、水温、濁度の分散係数 ( $D$ ) $D = Q_{out} \times 0.01$ (m <sup>2</sup> /day) 水面反射係数 0.01 水面吸収率 0.5 日射量減衰係数 0.2
4.	流入流量 ・吉野川本川流量 支川大北川、瀬戸川流量 汗見川取水量 ・平時時は日平均値、洪水時は2時間毎の平均値。		粒 径 常 時 (流入濁度 100ppm 以下) $2\mu - 25\%$ $4\mu - 50\%$ $6\mu - 25\%$ 洪水時 (流入濁度 100ppm 以上) $2\mu - 15\%$ $4\mu - 60\%$ $6\mu - 25\%$
5.	放流流量 ・クレスト越流量 (敷高 EL 325 m) 発電取水量 (いずれも、51年の実績操作に基づくが、取水は通常、水面下 4 m からの表層取水である) ・平時時は日平均値、洪水時は2時間毎の平均値。		
6.	洪水流入期間 ・S 51. 4. 13～17 (ピーク流量 = 571 m <sup>3</sup> /s) ・S 51. 7. 23～28 (ピーク流量 = 2087 m <sup>3</sup> /s) ・S 51. 9. 8～16 (ピーク流量 = 4760 m <sup>3</sup> /s)		
7.	流入水温 ・本川、支川ごとに、実測値を用い、欠測値は補		

## 2) 小見野々、長安口及び川口貯水池<sup>2), 3)</sup>

徳島県南部を西から東へ流れ、紀伊水道に注ぐ那賀川水系には大小5つの貯水池が建設されているが、このうち、本川沿い上流より、図－４－４に示すような位置にあるものが、小見野々、長安口、川口の各貯水池である。那賀川は、流域面積806km<sup>2</sup>、総延長116kmの中規模河川であり、その上流域の地質的、水文的特徴は、上述した吉野川のそれと類似している。

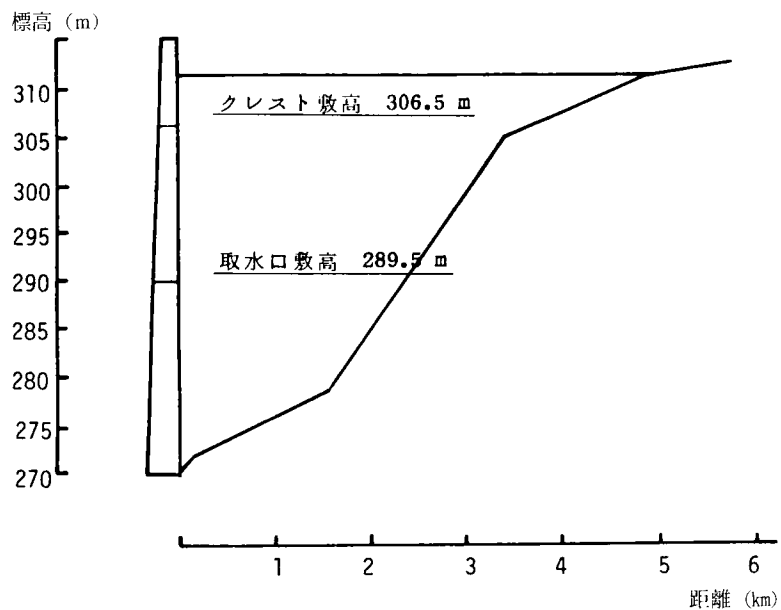
各貯水池の諸元は、表－４－３に示すようである。各ダムにおいては、図－４－５～７の各貯水池縦断面図に示したような取放水設備を使って、常時、発電用取水が実施され、また洪水時には洪水調節が実施される。各貯水池ならびに各貯水池間の河道には、いくつかの支川が流



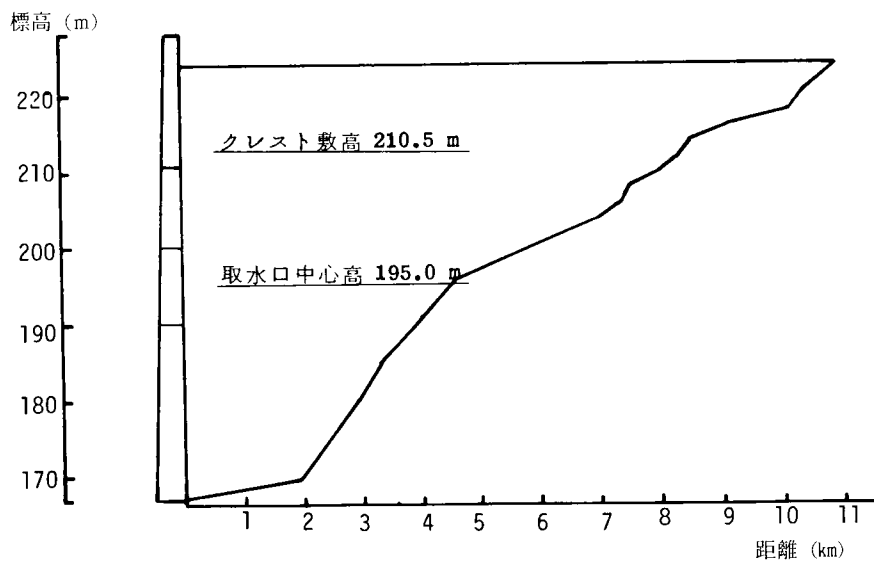
図－４－４ 那賀川流域図

表－４－３ 小見野々・長安口及び川口貯水池の諸元

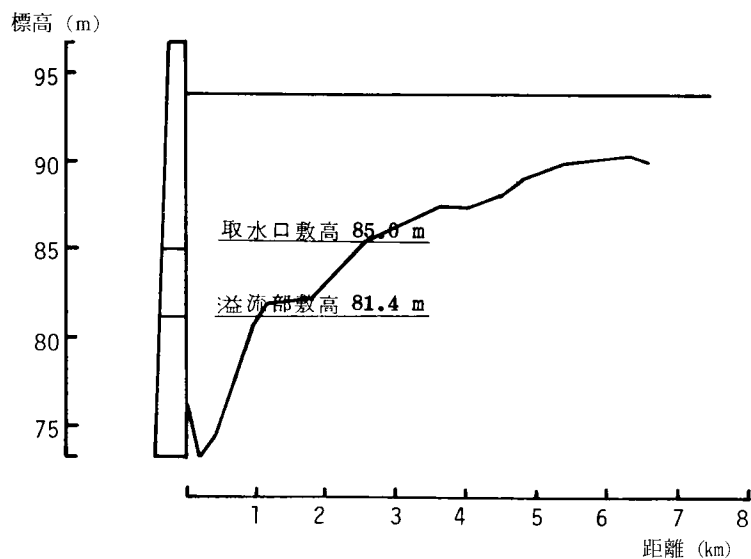
項 目	川口貯水池	長安口貯水池	小見野々貯水池
目 的	発電 逆調	治水 発電 かんがい	発電
竣 工 年	S 36年	S 31年	S 43年
所 在 地	相生町吉野	上那賀町長安口	木頭村助
ダ ム 型 式	重力式コンクリート	重力式コンクリート	アーチ式コンクリート
ダ ム 高 (m)	30.0	85.5	62.5
集 水 面 積 (km <sup>2</sup> )	直接 616.7 間接 40.6	直接 494.3 間接 44.6	直接 266.8 間接 4.5
湛 水 面 積 (km <sup>2</sup> )	0.87	2.238	0.89
総貯水容量 (m <sup>3</sup> )	$6,220 \times 10^3$	$54,278 \times 10^3$	$13,925 \times 10^3$
有効貯水容量 (m <sup>3</sup> )	$950 \times 10^3$	$43,497 \times 10^3$	$9,748 \times 10^3$
治 水 容 量 (m <sup>3</sup> )	—	$10,960 \times 10^3$	—
常時満水位 (m)	EL 95.0	EL 225.0	EL 314.0
最低水位 (m)	EL 93.5	EL 195.0	EL 296.0



図一4-5 小見野々貯水池縦断面図



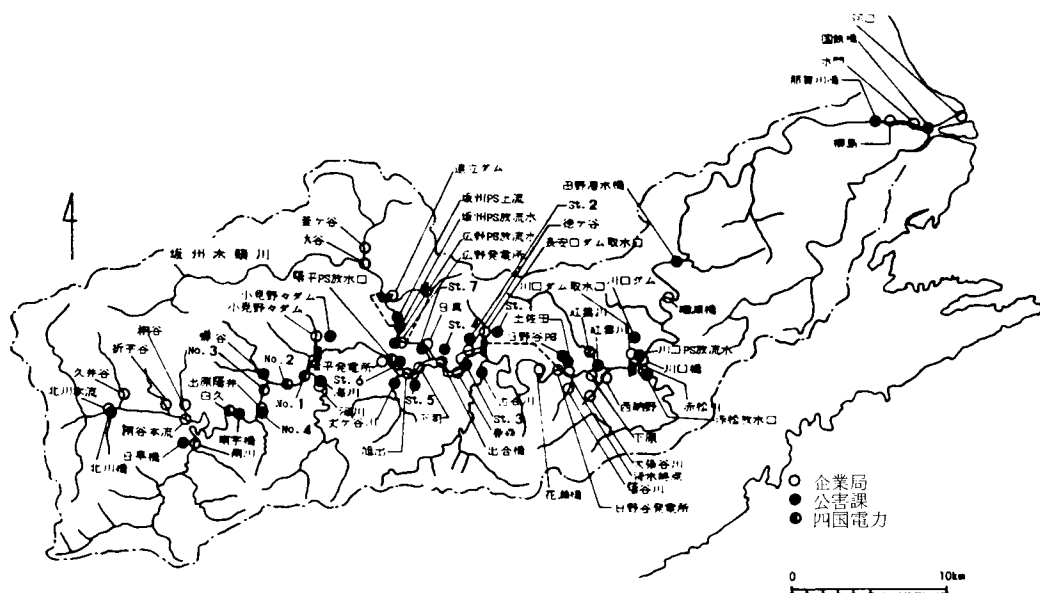
図一4-6 長安口貯水池縦断面図



図－4－7 川口貯水池縦断面図

入しているが、そのうち、主なものを示すと図－4－8のようであり、最大の支川は、長安口ダム上流約5kmの地点へ流入する坂州木頭川である。図－4－8には、各貯水池及び河道における水温、濁度の観測地点も同時に示している。

各貯水池の水利・水文的性格についてみると、小見野々及び長安口貯水池は夏季に主として流出要因による水温成層が形成される成層型貯水池であるのに対し、川口貯水池は、年間を通じ



図－4－8 那賀川への主な流入支川と水温、濁度観測点

てほぼ様な水温分布を示す混合型貯水池に分類される。ところが、小見野々及び長安口貯水池は、流入量に比して貯水容量が比較的小さいために、洪水の流入による影響を受け易く、しばしば成層が破壊され短期的には混合型の性格を示すことがあり、そうした出水がたび重なる年には、年間を通じて中間型あるいは混合型となる場合もある<sup>4)</sup>。

著者らは、以上に述べた小見野々、長安口、川口の3貯水池系を対象に、昭和50年1月より昭和53年5月の期間を対象に、水温及び濁度解析を実施したが、本章ではこのうち、昭和52年7月1日～昭和53年5月31日の期間における解析例について述べることにする。

この期間の解析に用いた入力資料及び各種計算条件は、表-4-4、5に示すようである。表-4-5において各支川流量は流域面積比により配分され、濁度の推定式は、実測資料より得られた流量-濁度の関係に基いて設定し、昭和52年7月1日以前の計算において適当に調整されたものである。たとえば、小見野々貯水池への流入濁度及び坂州木頭川の濁度の推定式と実測値との関係はそれぞれ図-4-9及び図-4-10に示すようである。また、各貯水池への流入濁質の粒度分布に関する条件は、表-4-6～8に示す粒度分布資料を考慮した上で、若干の試行計算を実施し、その結果に基いて設定したものである。

貯水池へ流入する支川の取扱いについては、長安口貯水池へ流入する坂州木頭川及び川口貯水池へ流入する紅葉川以外のものは、その影響が極めて小さいと考えられることから、無視している。また、坂州木頭川及び紅葉川の流入は、横流入として取り扱っている。

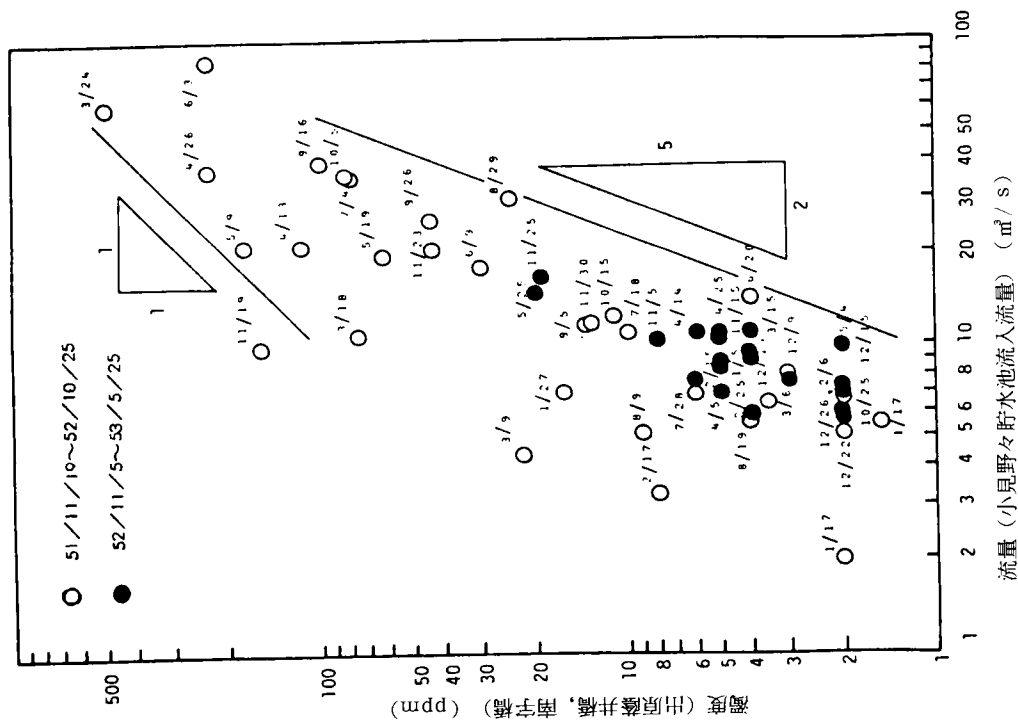
表-4-4 小見野々、長安口、川口の各貯水池に共通する解析条件及び入力資料

対 象 期 間	昭和52年7月1日より昭和53年5月31日
貯 水 池 形 状	各標高の平面積及び湛水長は図面計測
貯 水 位	平常時には毎日の午前0時の値 洪水期間中は毎時の値
放 流 ・ 流 入 流 量	平常時には日平均値、洪水期間中は時間平均値  なお、洪水期間は、水文資料を検討した上で、次の期間とした 昭和52年8月24日～10月10日 " 11月16日～12月19日 昭和53年5月16日～5月31日
気温、湿度、風速、雲量	資料が整備されている徳島地方気象台の日平均値
日 射 量	資料がないため、徳島地方気象台の日照時間データより換算した値を用いる
運 動 量、水 温、 濁 度 の 分 散 係 数	一様等方性を仮定し、それぞれの係数は等しく $D$ とおき、 $D = Q_{out} \times 0.01$ ( $m^2/day$ ) ここに $Q_{out}$ : 放流流量 ( $m^3/sec$ )
水 面 反 射 係 数 ( $a_r$ )	$a_r = 0.4$
水 面 吸 収 率 ( $\beta$ )	$\beta = 0.5$
日 射 量 減 衰 係 数 ( $\eta$ )	$\eta = 0.15$

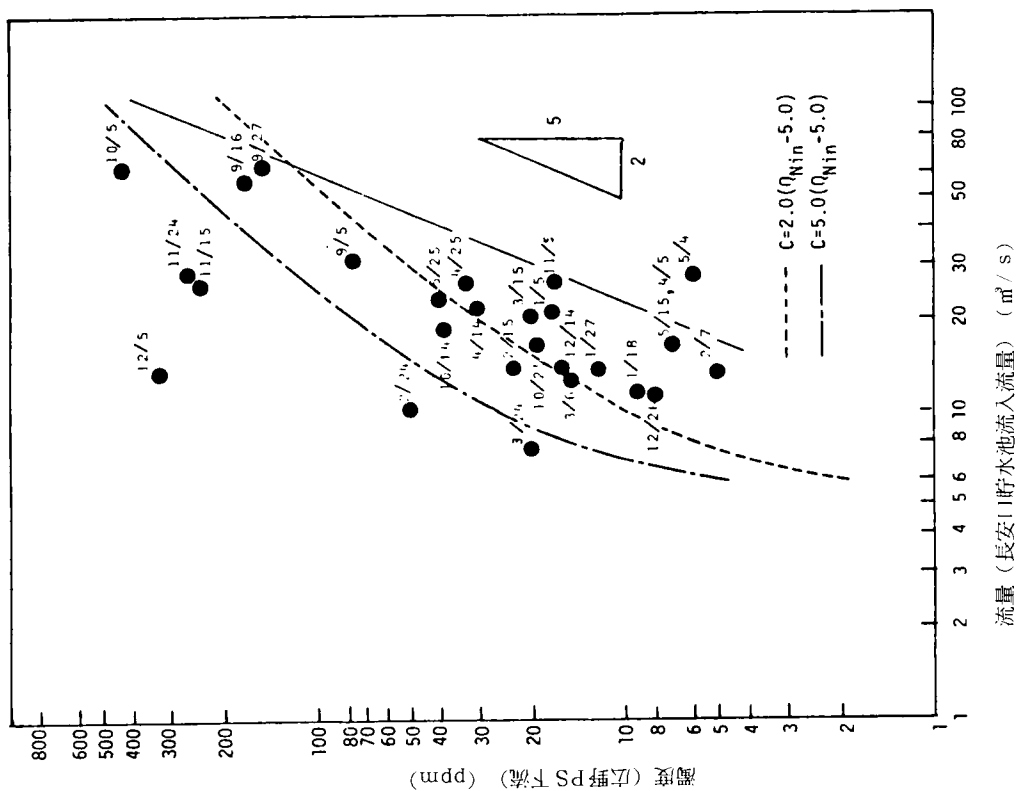
表-4-5 小見野々・長安口・川口の各貯水池における流入水温、濁度等に関する条件

	小見野々貯水池	長安口貯水池	川口貯水池
流入水温	南宇橋、出原蔭井橋（白久測水所）の観測値 ただし、欠測日には比例補間した値	本川、丈ヶ谷川、坂州木頭川の水温は等しいものと仮定 流入水温は、小見野々貯水池の放流水温の計算結果	本川、古屋谷川、紅葉川の水温は等しいものとして 長安口貯水池放流水温（計算値）を与える
流入濁度 支川流量	南宇橋、出原蔭井橋（白久測水所）の観測値 ただし、欠測日に関し、平常時においては比例補間した値、洪水時には流量－濁度の関係から求めた値	$Q_{Nin} = Q_{KMout} + Q_S + Q_J$ $Q_S = 0.80(Q_{Nin} - Q_{KMout})$ $Q_J = 0.20(Q_{Nin} - Q_{KMout})$ $C_{Nin} = \frac{C_{KMout} \cdot Q_{KMout} + C_J \cdot Q_J}{Q_{KMout} + Q_J}$ $Q_J < 5 \quad (m^3/s) \quad C_J = 0 \quad (ppm)$ $5 \leq Q_J < 105 \quad (m^3/s) \quad C_J = 4(Q_J - 5) \quad (ppm)$ $105 \leq Q_J \quad (m^3/s) \quad C_J = 0.5(Q_J - 105) + 400 \quad (ppm)$ 昭和52年7月1日～11月17日、昭和53年4月15日～5月31日 $Q_{Nin} > 5 \quad (m^3/s) \quad C_S = 2.0(Q_{Nin} - 5) \quad (ppm)$ $5 \leq Q_{Nin} \quad (m^3/s) \quad C_S = 0 \quad (ppm)$ 昭和52年11月18日～昭和53年4月14日 $Q_{Nin} > 5 \quad (m^3/s) \quad C_S = 5.0(Q_{Nin} - 5) \quad (ppm)$ $5 \leq Q_{Nin} \quad (m^3/s) \quad C_S = 0 \quad (ppm)$	$Q_{KWin} = Q_{Nout} + Q_F + Q_M$ $Q_F = 0.638(Q_{KWin} - Q_{Nout})$ $Q_M = 0.362(Q_{KWin} - Q_{Nout})$ $C_{KWin} = \frac{C_{Nout} \cdot Q_{Nout} + C_F \cdot Q_F}{Q_{Nout} + Q_F}$ $Q_F \leq 5 \quad (m^3/s) \quad C_F = 0 \quad (ppm)$ $5 < Q_F \leq 55 \quad (m^3/s) \quad C_F = 2.0(Q_F - 5.0) \quad (ppm)$ $55 < Q_F \quad (m^3/s) \quad C_F = 0.5(Q_F - 55.0) + 100 \quad (ppm)$ $Q_M \leq 5 \quad (m^3/s) \quad C_M = 0 \quad (ppm)$ $5 < Q_M \leq 55 \quad (m^3/s) \quad C_M = 2.0(Q_M - 5.0) \quad (ppm)$ $55 < Q_M \quad (m^3/s) \quad C_M = 0.5(Q_M - 55.0) + 100 \quad (ppm)$
粒 径	流入濁度が $\leq 150 ppm$ 未満の場合 $2 \mu - 50 \%$ $4 \mu - 20 \%$ $6 \mu - 30 \%$  流入濁度が $\geq 150 ppm$ 以上の場合 $2 \mu - 40 \%$ $4 \mu - 25 \%$ $6 \mu - 35 \%$	$C_{Nin} < 150 \quad (ppm)$ $2 \mu - 60 \%$ $4 \mu - 30 \%$ $6 \mu - 10 \%$ $2 \mu - 40 \%$ $4 \mu - 45 \%$ $6 \mu - 15 \%$ $C_{Nin} \geq 400 \quad (ppm)$ $2 \mu - 10 \%$ $4 \mu - 30 \%$ $6 \mu - 60 \%$	$C_{KWin} < 200 \quad (ppm)$ $2 \mu - 60 \%$ $4 \mu - 30 \%$ $6 \mu - 10 \%$ $200 \leq C_{KWin} < 400 \quad (ppm)$ $2 \mu - 40 \%$ $4 \mu - 45 \%$ $6 \mu - 15 \%$ $C_{KWin} < 400 \quad (ppm)$ $2 \mu - 10 \%$ $4 \mu - 30 \%$ $6 \mu - 60 \%$

ここに、 $Q_{Nin}$ ：長安口貯水池流入流量、 $C_{Nin}$ ：長安口貯水池上流端流入濁度（上流端濁度境界条件）、 $Q_{KMout}$ 、 $C_{KMout}$ ：小見野々貯水池放流水流量、放流水濁度、 $Q_S$ 、 $C_S$ ：坂州木頭川流量、濁度、 $Q_J$ 、 $C_J$ ：丈ヶ谷川流量、濁度、 $Q_{KWin}$ ：川口貯水池上流端流入濁度、 $Q_{Nout}$ 、 $C_{Nout}$ ：長安口貯水池放流水流量、放流水濁度、 $Q_F$ 、 $C_F$ ：古屋谷川流入流量、流入水濁度、 $Q_M$ 、 $C_M$ ：紅葉川流入流量、流入水濁度である。



図一4—9 小見野々貯水池流入流量と濁度との関係



図一4—10 長安貯水池流入流量と坂州木頭川濁度との関係

表一 4-6 小見野々貯水池へ流入する  
濁質の粒度分布

出水時(昭和52年11月21日) 南宇橋

粒 径 ( $\mu$ )	濁 度 ( $\text{mg/l}$ )	百 分 率 (%)	累加百分率 (%)
1.5	0.22	4.9	4.9
2	0.41	9.1	14.0
2.5	0.57	12.6	26.6
3	0.62	13.7	40.3
4	0.60	13.2	53.5
5	0.54	11.9	65.4
6	0.46	10.2	75.6
8	0.38	8.4	84.0
10	0.29	6.4	90.4
12.5	0.23	5.1	95.5
16	0.13	2.9	98.4
20	0.08	1.8	100.2

平常時(昭和52年11月30日) 南宇橋

粒 径 ( $\mu$ )	濁 度 ( $\text{mg/l}$ )	百 分 率 (%)	累加百分率 (%)
1.5	0.105	13.7	13.7
2	0.092	12.0	25.7
2.5	0.088	11.5	37.2
3	0.081	10.6	47.8
4	0.078	10.2	58.0
5	0.071	9.3	67.3
6	0.070	9.1	76.4
8	0.064	8.3	84.7
10	0.046	6.0	90.7
12.5	0.035	4.6	95.3
16	0.009	1.2	96.5
20	0.019	2.5	99.0
25	0.009	1.2	100.2

表一 4-7(a) 長安口貯水池へ流入する濁質の  
粒度分布(那賀川本川)

出水時(昭和52年11月21日)

長安口 St-6 表面

粒 径 ( $\mu$ )	濁 度 ( $\text{mg/l}$ )	百 分 率 (%)	累加百分率 (%)
1.5	0.11	1.2	1.2
2	0.33	3.5	4.7
2.5	0.99	10.5	15.2
3	2.15	22.9	38.1
4	2.65	28.2	66.3
5	1.80	19.1	85.4
6	0.87	9.3	94.7
8	0.33	3.5	98.2
10	0.10	1.1	99.3
12.5	0.04	0.4	99.7
16	0.02	0.2	99.9
20	0.01	0.1	100.0

平常時(昭和52年11月29日)

長安口 St-6 表面

粒 径 ( $\mu$ )	濁 度 ( $\text{mg/l}$ )	百 分 率 (%)	累加百分率 (%)
1.5	0.23	11.2	11.2
2	0.29	14.1	25.3
2.5	0.33	16.1	41.4
3	0.35	17.1	58.5
4	0.32	15.6	74.1
5	0.23	11.2	85.3
6	0.14	6.8	92.1
8	0.08	3.9	96.0
10	0.05	2.4	98.4
12.5	0.03	1.5	99.9
16			
20			
25			



表一 4—7(b) 長安口貯水池へ流入する濁質の  
粒度分布 (坂州木頭川)

出水時 (昭和52年11月21日)  
坂州 P. S. 放流口

粒 径 ( $\mu$ )	濁 度 ( $\text{mg/l}$ )	百 分 率 (%)	累加百分率 (%)
1.5	0.09	0.7	0.7
2	0.30	2.5	3.2
2.5	0.90	7.5	10.7
3	2.15	17.8	28.5
4	3.00	24.8	53.3
5	2.50	20.7	74.0
6	1.45	12.0	86.0
8	0.78	6.5	92.5
10	0.45	3.7	96.2
12.5	0.25	2.1	98.3
16	0.12	1.0	99.3
20	0.09	0.7	100.0

平常時 (昭和52年11月30日)  
坂州 P. S. 放流口

粒 径 ( $\mu$ )	濁 度 ( $\text{mg/l}$ )	百 分 率 (%)	累加百分率 (%)
1.5	0.10	0.8	0.8
2	0.31	2.6	3.4
2.5	0.83	7.0	10.4
3	1.62	13.6	24.0
4	2.15	18.0	42.0
5	2.05	17.2	59.2
6	1.60	13.4	72.6
8	1.15	9.6	82.2
10	0.83	7.0	89.2
12.5	0.59	4.9	94.1
16	0.35	2.9	97.0
20	0.24	2.0	99.0
25	0.11	0.9	99.9

表一 4—8 川口貯水池へ流入する  
濁質の粒度分布

出水時 (昭和52年11月30日)  
川口ダム流入地点 (日野谷 P. S. 放流口)

粒 径 ( $\mu$ )	濁 度 ( $\text{mg/l}$ )	百 分 率 (%)	累加百分率 (%)
1.5	0.09	0.8	0.8
2	0.31	2.7	3.5
2.5	0.97	8.3	11.8
3	2.60	22.3	34.1
4	3.25	27.9	62.0
5	2.60	22.3	84.3
6	1.10	9.4	93.7
8	0.37	3.2	96.9
10	0.12	1.0	97.9
12.5	0.07	0.6	98.5
16	0.08	0.7	99.2
20	0.09	0.8	100.0

平常時 (昭和52年11月21日)  
川口ダム流入地点 (日野谷 P. S. 放流口)

粒 径 ( $\mu$ )	濁 度 ( $\text{mg/l}$ )	百 分 率 (%)	累加百分率 (%)
1.5	0.13	1.8	1.8
2	0.42	5.8	7.6
2.5	1.10	15.2	22.8
3	1.90	26.3	49.1
4	1.85	25.6	74.7
5	1.10	15.2	89.9
6	0.39	5.4	95.3
8	0.20	2.8	98.1
10	0.08	1.1	99.2
12.5	0.03	0.4	99.6
16	0.02	0.3	99.9
20	0.01	0.1	100.0
25			

### 4.3. 解析条件に関する実証的検討<sup>5)</sup>

#### 4.3.1. 濁質粒度分布の効果

4.2. に述べた入力資料及び計算条件を用い、3章で述べた数値解析法によって、各貯水池における水温・濁度分布が求められるが、以下では、まず、解析に用いる各種の条件の妥当性及び有効性について検討を進めることにする。

貯水池へ流入する濁質の粒度分布に関する取扱いとそれに基づく濁度計算法は、3.4.1. に述べたが、この取扱いが、濁度の再現性に対してどの程度有効であるかを、一定な平均値を用いた場合の結果と比較しながら考察しよう。

図-4-11は、早明浦貯水池を対象に昭和51年17号台風による洪水時及びその後の期間において、濁質粒度を一定な平均値で与え、その値を $2\mu$ 、 $4\mu$ 、 $6\mu$ の3通りに変えて計算したときの流出濁度の結果を、実測値と比較したものである。この解析例では、水面勾配を省略した簡易計算法を用い、昭和51年9月6日0時の計算値を初期条件にそれぞれの計算を実施している。この図より、粒径の値すなわち沈降速度の値が、濁度の計算結果に大きな影響を与え、これを正しく

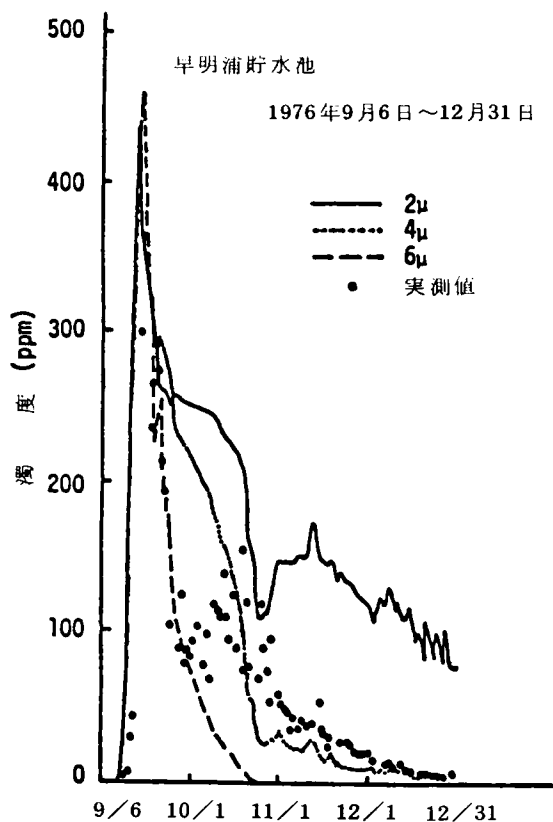


図-4-11 一様粒径を用いた場合の早明浦貯水池流出濁度の計算結果

把握することが、現象再現のためには不可欠であることを示していると同時に、粒径を一定な平均値で与えた場合には、いずれの値によっても全期間を通じての満足な結果は得られず、こうした取扱いでは実際現象の再現は期待し得ないことがわかる。

これに対し、表-4-2に示したような濁質粒度分布を用い、各粒径ごとの濁度計算結果を重ね合せて得られたものが、図-4-12に示す結果である。この結果を図-4-11のものと比較すると、洪水直後の期間における濁度の急激な低減が10月以降には緩やかなものへと移る過程が、少なくとも定性的にはより良く再現されていることがみられる。実測値との比較では、10月～11月初旬の期間においてまだかなりの不一致がみられるが、これは、入力資料の不備やそれに

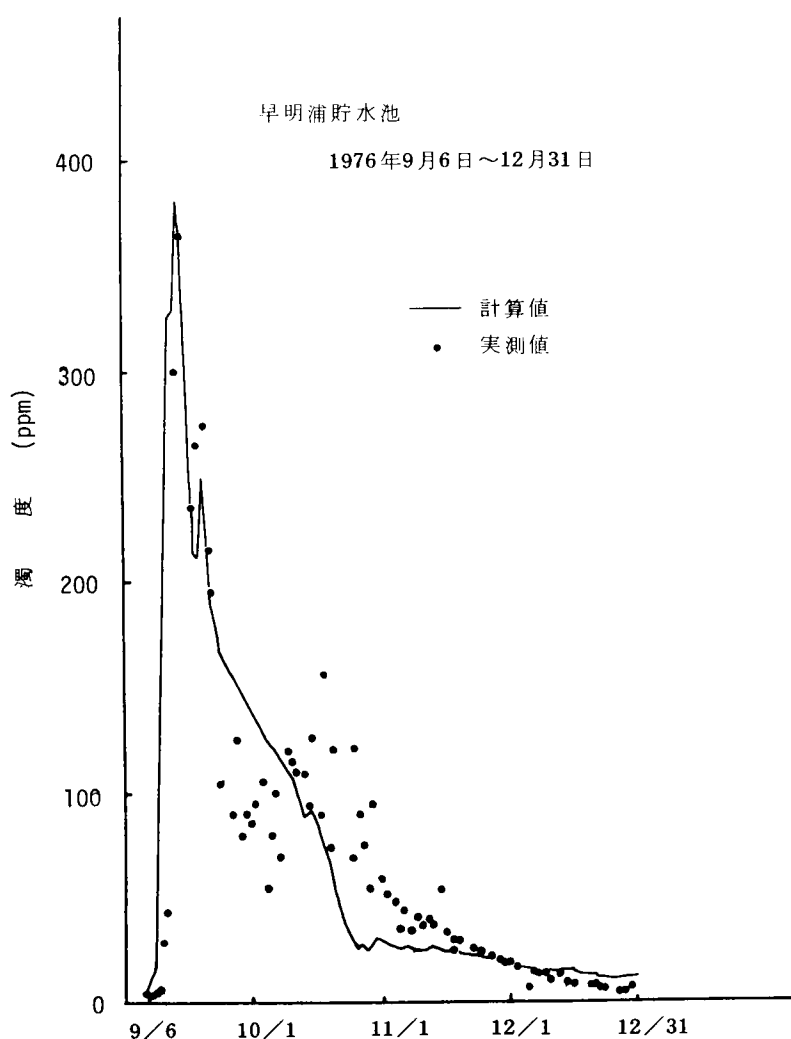


図-4-12 濁質の粒度分布変化を考慮したときの早明浦貯水池流出濁度の計算結果

伴なう計算法の単純化により、対流混合に伴なう濁質の再浮上の影響が十分に再現されなかったことに起因していると考えられる。したがって、濁質粒度の取扱いに関する限りは、粒度分布変化を考慮した解析によって、現実の濁度低減特性をより忠実に再現することが可能になるといえるよう。

#### 4.3.2. 分散係数の影響

貯水池内における各水理量に関する分散係数の値とその時間的・空間的分布については、現在のところ明らかでなく、その取扱いは今後の研究課題の一つである。このため、各分散係数に関しては3.4.2.に述べたような便宜的な取扱いをしているが、その妥当性はともかくとして、実際の貯水池における解析において、この値が水温及び濁度等の計算結果にどの程度の影響を及ぼすかについて述べておくと以下のようなようである。

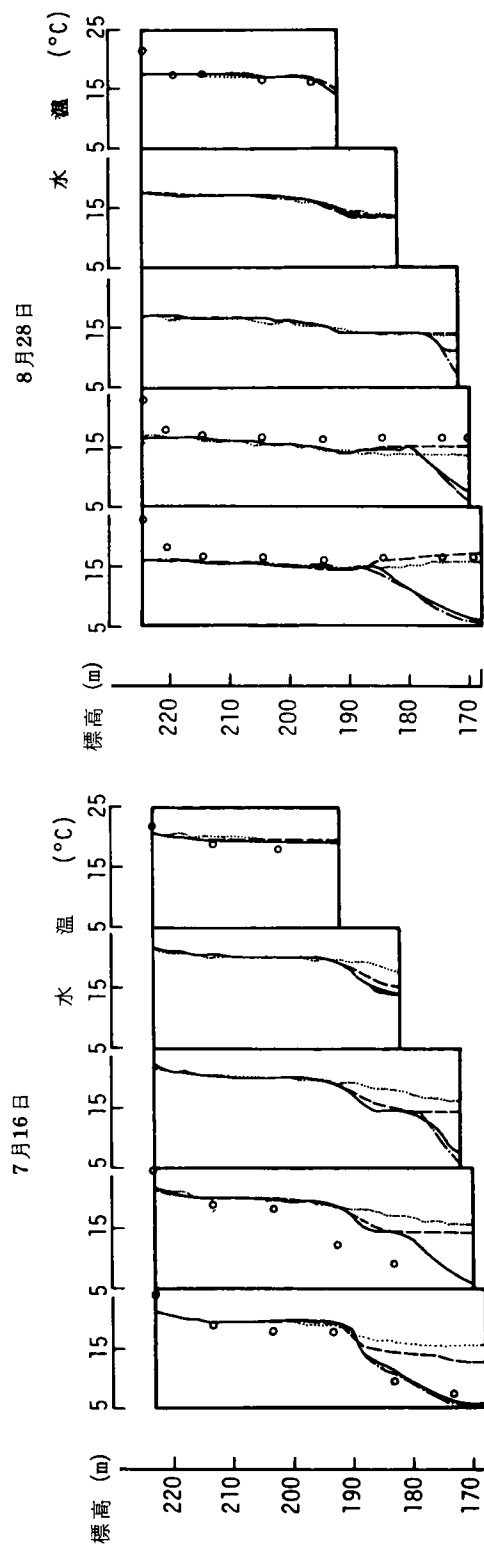
図-4-13は、長安口貯水池を対象とした昭和50年の解析において、分散係数の値に Reynolds 相似を仮定し、時間的・空間的にも一定として、その値を $0.0125 \text{ (m}^2/\text{day)}$ より $12.5 \text{ (m}^2/\text{day)}$ と $10^3$ 倍までオーダーを変え、簡便法で計算したときの水温分布例であり<sup>6)</sup>、図-4-14は濁度のそれである。水温分布は7月の水温成層期ならびに8月末の洪水による成層破壊後のものであり、濁度分布は同じ洪水後のものである。水温分布に関しては、分散係数の値による影響が水温勾配の大きい変水層で顕著となり、この値が大きいほど水深方向への一様化が認められる。この傾向は濁度分布についても同様であるが、濁度の場合にはさらに流れ方向への一様化もみられる。実測値との比較でみると、平常時の7月の水温分布では、分散係数が小さいほど良い一致を示しているが、洪水後の例では、水温、濁度ともに逆の結果となっている。

一方、図-4-15には、上述した各々の計算により得られた長安口貯水池よりの流出濁度の結果を、8月の洪水前後の期間について示しているが、この図では、分散係数値による影響は余り顕著に認められないことがわかる。この傾向は流出水温についても同様である。これは、流出水温及び濁度が取水層内で平均化された値であるために、上述した各分布に対するものよりはその影響が現われにくいためであろう。

いずれにせよ、これらの数値実験結果より、実際現象、とくに水温及び濁度等の分布を忠実に再現するためには、分散係数の値をできるだけ正確に与えることが必要であることが確認された。また、実測値との比較でみると、平常時には $10^{-1} \sim 10^{-2} \text{ (m}^2/\text{day)}$ のオーダーの値、洪水時には $10^1 \sim 10^2 \text{ (m}^2/\text{day)}$ のオーダーの値を与えれば、長安口貯水池においては比較的良好な再現精度が期待できるように思われるが、分散係数値を正確に知ることができない現段階ではこれらの値が正しいものかどうかは明らかでない。したがって、現段階においては、3.4.2.で述べたような便宜的な方法により、分散係数値を適当に調整していくこともやむを得ないであろう。

長安口貯水池  
-1975-

計算値  
 ---  $D=0.0125$  ( $\text{m}^2/\text{day}$ )  
 —  $D=0.125$  ( $\text{m}^2/\text{day}$ )  
 - - -  $D=1.25$  ( $\text{m}^2/\text{day}$ )  
 .....  $D=12.5$  ( $\text{m}^2/\text{day}$ )  
 ○ 実測値



図—4—13 種々の分散係数値に対する水温分布計算結果の比較

長安口貯水池  
-1975-

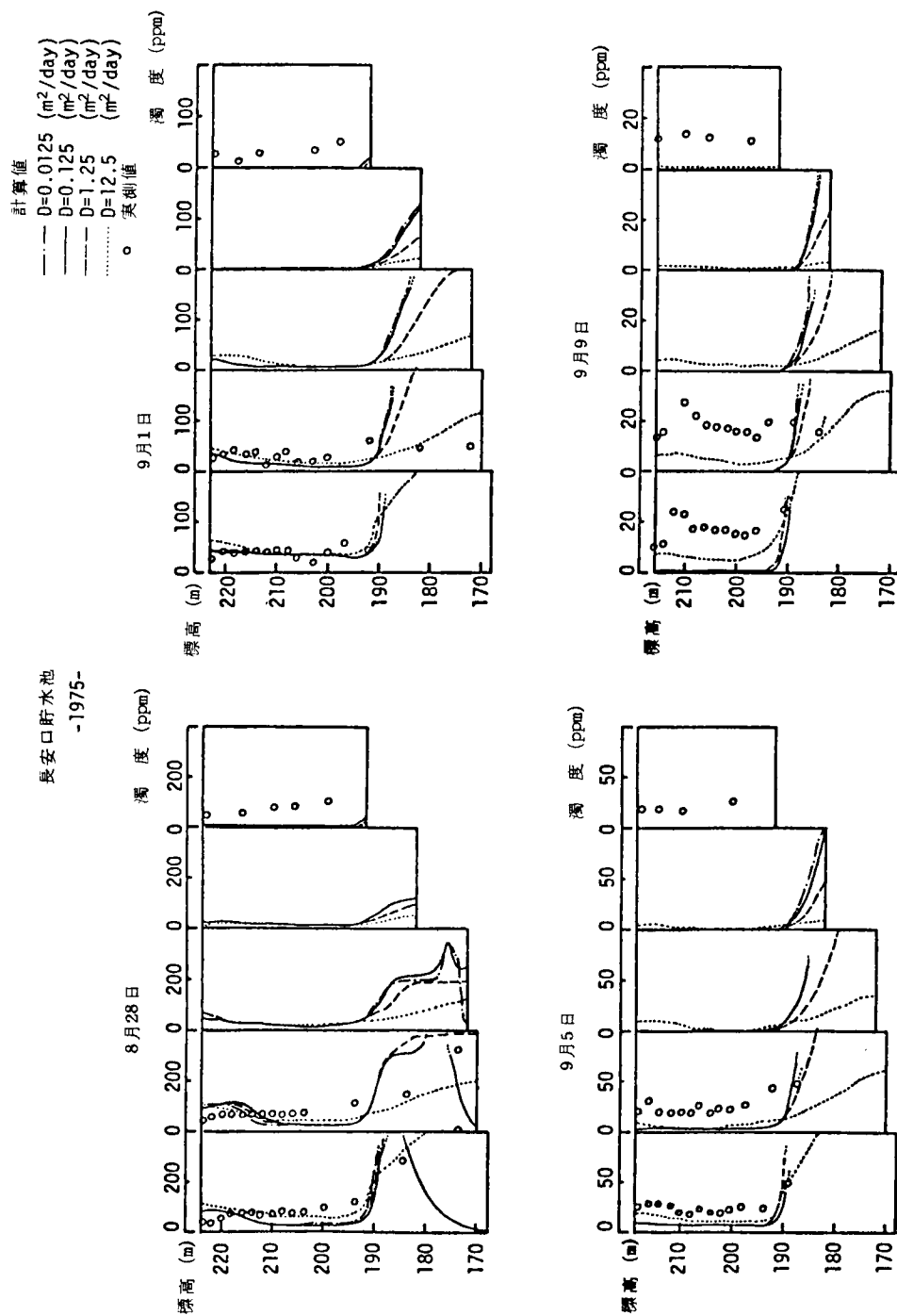
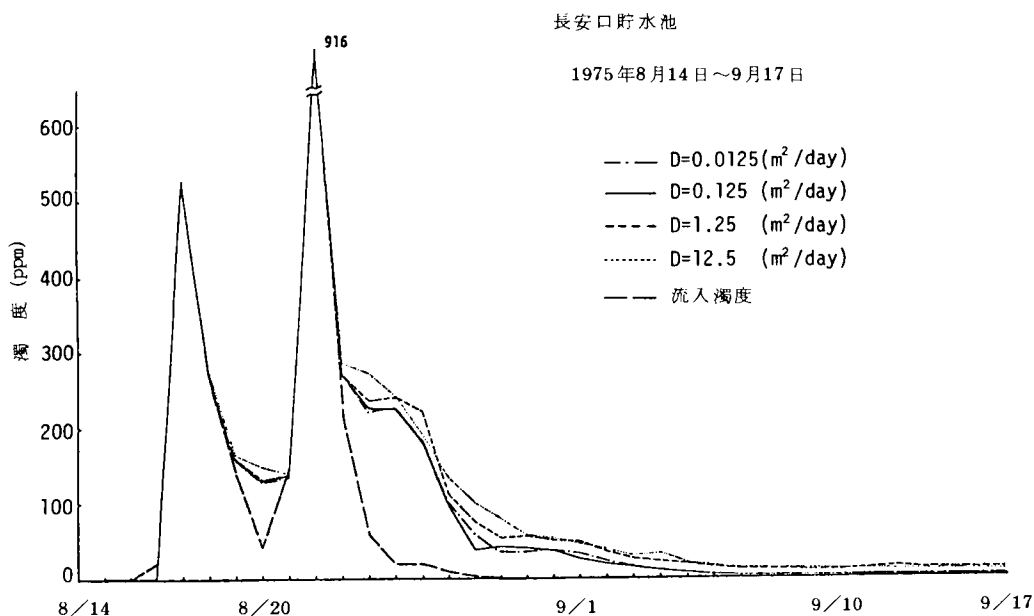


図-4-14 種々の分散係数値に対する濁度分布計算結果の比較

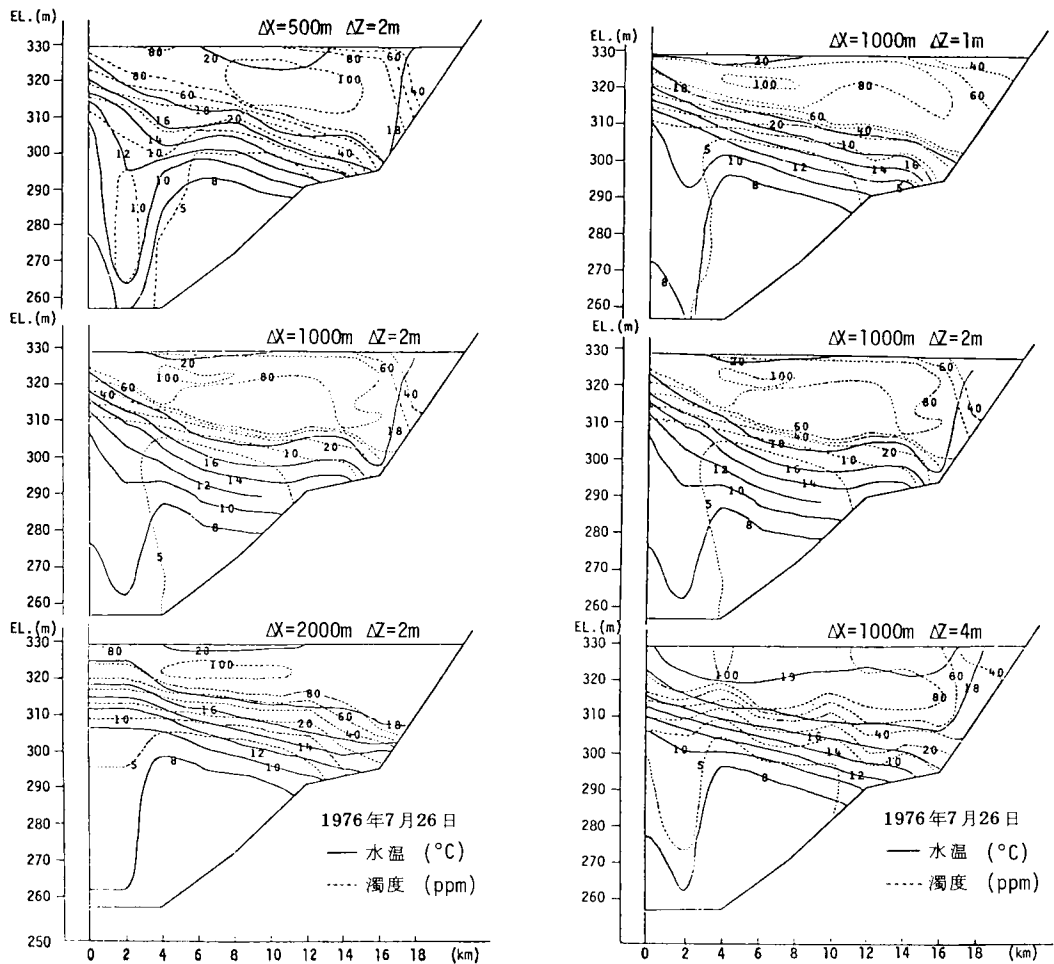


#### 4.3.3. $\Delta x$ 及び $\Delta z$ の値に関する検討<sup>5), 7)</sup>

貯水池水理の数値解析に用いる  $\Delta x$  及び  $\Delta z$  の値は、対象とする水理要素の空間的一様性に基いて決めなければならないが、実際上は、数値解析による現象の再現精度より評価しておくことも必要である。このため、実際の解析において、 $\Delta x$  及び  $\Delta z$  の値が計算結果にどの程度影響するかを、早明浦貯水池を対象に検討した例が、図—4—16である。この図は、簡便法により計算された昭和51年7月洪水後の水温及び濁度分布の結果であるが、比較のために、このときの実測資料による分布を示すと、図—4—17のようである。

これらの図より、水温分布に関しては、 $\Delta x$  及び  $\Delta z$  の値を変えると、等温線の間隔や傾きにいくらか差を生じ、これらを大きくすればするほど、水深方向及び流れ方向への変化が緩やかになる傾向があるが、その程度は大したものではないことがわかる。また、実測値との比較ではいずれも比較的良好で、大差はみられない。一方、濁度分布は、 $\Delta z$  の値を変えた場合には、値が大きいときに水深方向の変化がやや緩やかになる程度で余り顕著な影響を受けないのに対し、 $\Delta x$  を変えたときには、その値を大きくすればするほど流れ方向への一様化が顕著にみられるようになる。とくに、 $\Delta x$  を2000 mとした場合には、水温同様ほぼ水平な濁度分布となり、実測値の定性的な再現さえも期待できなくなる。

次に、こうした濁度解析結果に対する  $\Delta x$  の影響を、図—4—18に示す長安口貯水池におけるより詳細な解析例で検討しよう。この図では、昭和52年8月24日に流入した洪水に伴う濁水の

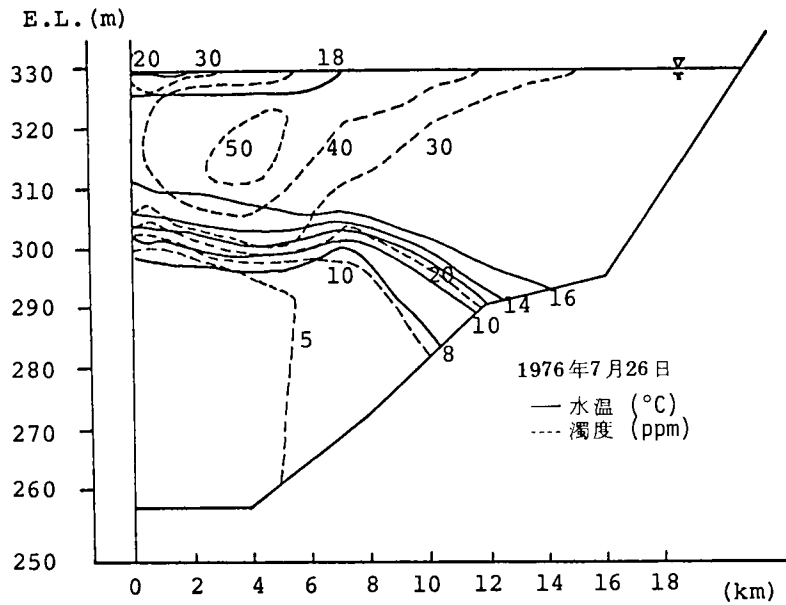


図—4—16 種々の $\Delta x$ 及び $\Delta z$ の値による水温、濁度分布の計算例  
(早明浦貯水池, 昭和51年7月26日)

伝播、貯留過程の結果を示しているが、伝播過程では、 $\Delta x$ の値を大きくするほど流れ方向への濁度の分散効果が大きくなり、その結果として、濁水先端部の伝播が早くなるとともに、濁度の最大値は低くなることが認められる。一方、洪水の流入後2日以上を経過した8月26日24時以後の希釈・貯留過程では、 $\Delta x$ の値を変えたことによる影響は余り目立たないようになるが、 $\Delta x$ を100 mとした結果では、取水口での取水による影響がより顕著に表わされている。実測値との比較は、図—4—19に示す8月30日のものとのみ行いうるが、いずれも比較的良好一致を示している。しかし、 $\Delta x$ を大きくするほど、実測値にみられる取水の影響を十分に再現し得なくなる傾向がある。

以上の解析例より、 $\Delta x$ 及び $\Delta z$ の値が水温及び濁度分布の計算結果へ及ぼす影響をまとめると、次のようであろう。 $\Delta x$ 及び $\Delta z$ の値が大きいほど流れ方向及び水深方向への分散効果が大きく計





図－４－１７ 実測資料による早明浦貯水池の水温・濁度分布  
(昭和51年7月26日)

算されるため、洪水時の濁水の伝播過程のように時間的・空間的スケールが小さな現象に対しては十分に小さな値を用いないと、現象の再現は望めない。しかし、水温分布や洪水後の貯留過程における濁度変化のように、比較的变化が緩やかな場合には、図－４－１７及び図－４－１９に示した実測例との比較からみる限りはそれほど小さな値を用いる必要はなく、 $\Delta x = 500 \sim 1000 \text{ m}$ 、 $\Delta z = 1 \sim 2 \text{ m}$ 程度にとれば、所要の現象再現精度が得られるようである。

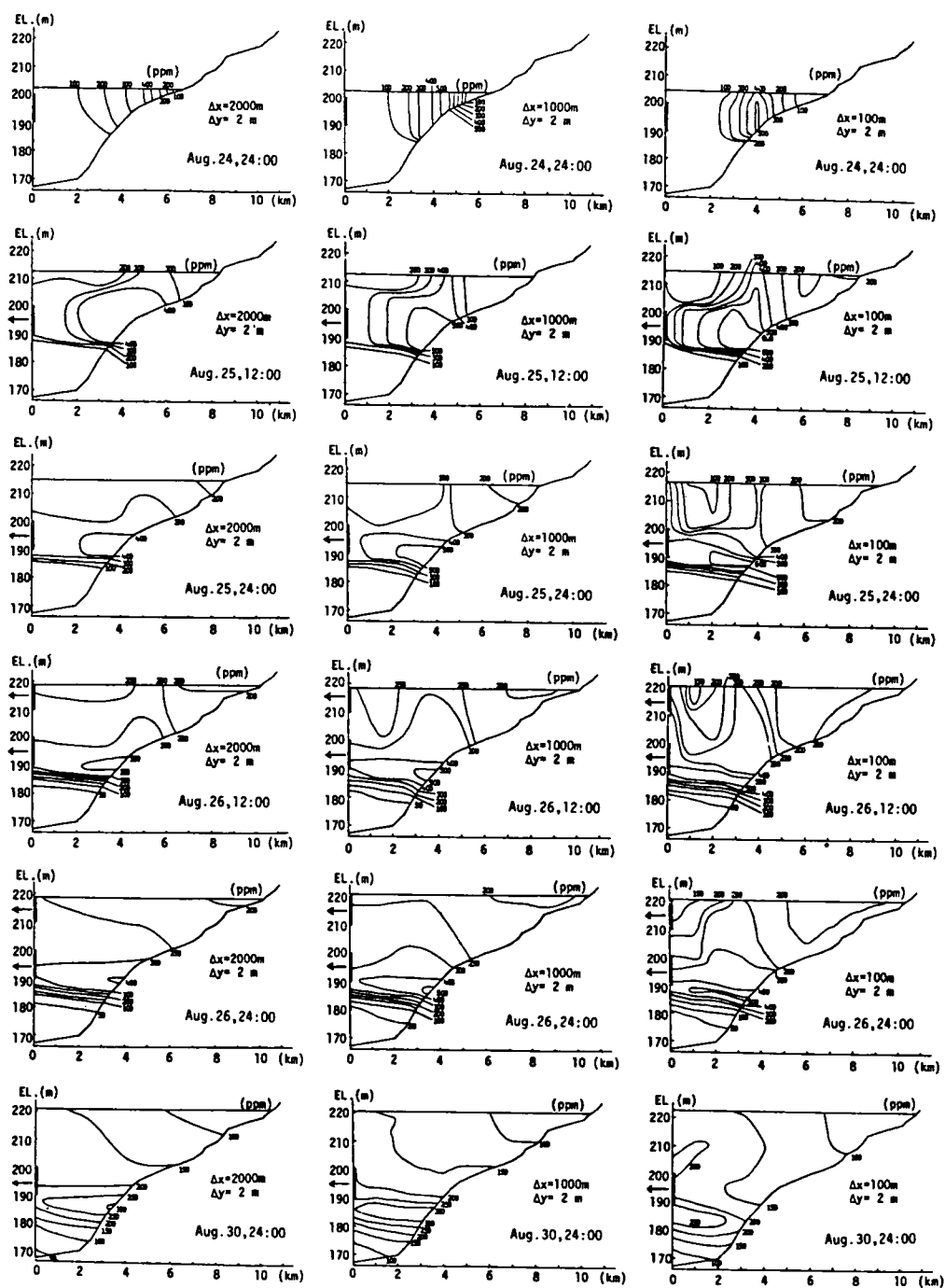
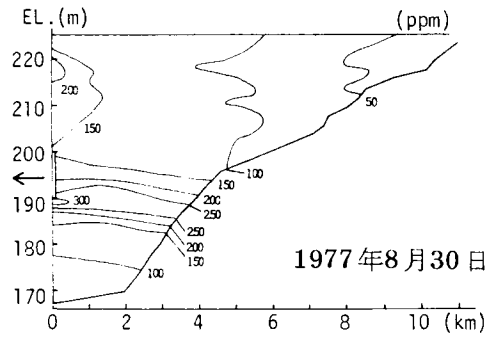


図 4-18 種々の  $\Delta x$  の値による濁度分布の計算例  
(長安口貯水池, 昭和52年8月24日~8月30日)



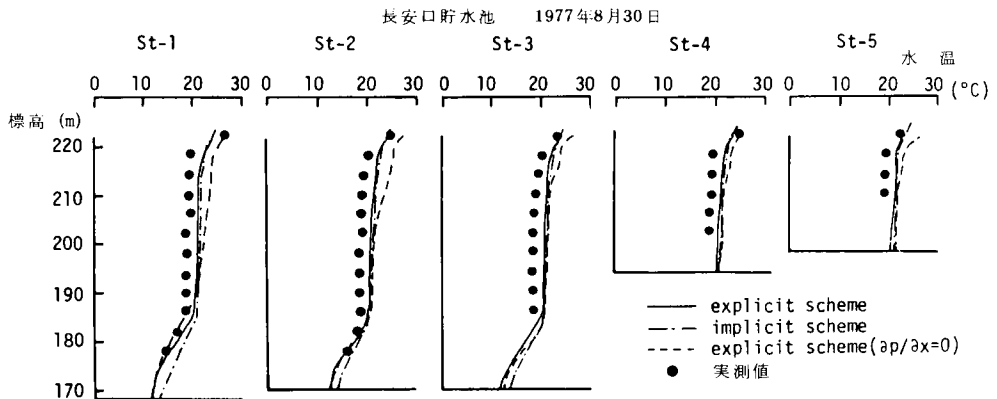
図一 4 - 19 実測資料による長安口貯水池における濁度分布  
(昭和52年 8 月30日)

#### 4. 4. 水温，濁度の予測例とその考察

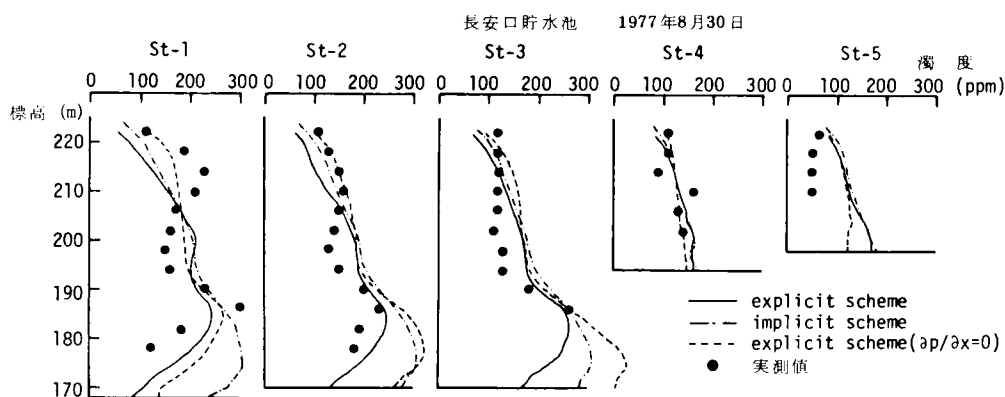
##### 4. 4. 1. 種々の数値解析法による結果の比較

4. 3. における種々の計算結果は，いずれも水面勾配を省略した簡便法によるものであったが，実測値との比較では所要の精度が得られ，解析に用いたモデルと 3. 4. 及び 3. 5. で述べた諸条件に関する取扱いの有効性，妥当性が一応確められた。しかし，貯水池内における各種水理要素の挙動をできるだけ忠実に取り扱い，現象をより明らかにするためには，2. 5. 2. に述べた数学モデルをそのまま数値解析する方法，すなわち水面勾配を省略しない explicit 法あるいは partial implicit 法によらなければならないことは言うまでもない。そこで，以下では，長安口貯水池を対象とした，explicit 法及び partial implicit 法による解析例を，簡便法による結果と比較しながら考察し，数学モデル及び各数値解析法の適用性について論ずることとする。

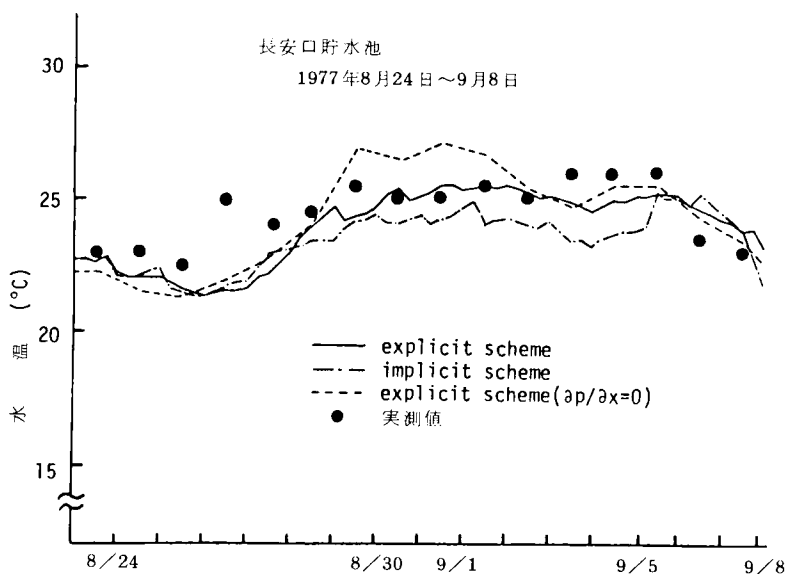
図 - 4 - 20 ~ 23 は，そうした解析例を示したものである。各計算は表 - 4 - 5 に示した諸条件のもとで実施されているが，計算期間を昭和52年 8 月24日 ~ 9 月 8 日とした関係から，初期条



図一 4 - 20 種々の数値計算法による水温分布結果の比較



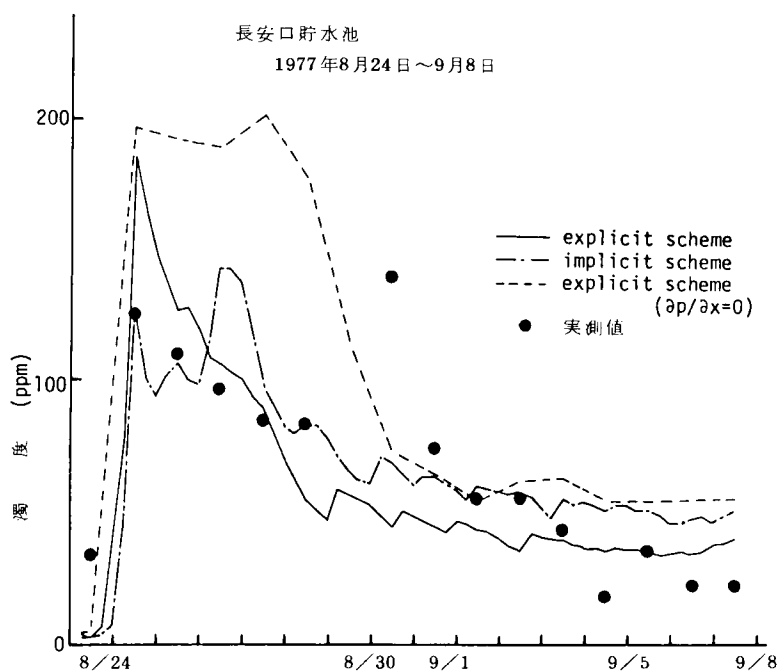
図－４－２１ 種々の数値計算法による濁度分布結果の比較



図－４－２２ 種々の数値計算法による長安口貯水池水表面温度の計算値の比較

件については、水温及び濁度の初期値を、簡便法による8月24日10時の計算値で与え、流速の初期値を3.3.3.で述べた方法で設定している。なお、時間間隔  $\Delta t$  は各計算法による安定条件を満たすように決められるが、explicit法では0.0004 day (34.56秒)、partial implicit法では0.002 day (172.8秒)を対象とする全期間を通じて用いている。

図－４－２０の水温分布の結果をみると、explicit法によるものが、実測値と最も良い一致を示していることがわかるが、partial implicit法による結果は、深水層での値がやや高く、精度の向上は認められない。こうした傾向は、図－４－２１の濁度分布の結果ではより顕著である。一方、図－４－２２及び図－４－２３に示す水表面温度及び濁度の結果をみると、いずれの図において



図一4—23 種々の計算法による長安口水表面濁度の計算値の比較

も、水面勾配を省略しない計算法による方が、省略した簡便法によるものより、実際の時間的変化傾向をより正しく反映していることが認められる。ただし、濁度に関しては、ピーク時や8月30～9月1日にかけての期間で実測値との不一致がいずれの結果においてもみられるが、これは入力資料の不備及びそれに伴う各種計算条件の単純化によるものと考えられる。

これらの結果より、水面勾配を省略しない数値解析法では、貯留水の流れの運動学的挙動をより正しく取り扱うことから、流速分布ならびにその影響が支配的な水温及び濁度の挙動を、少なくとも定性的にはより良好に再現しうることが実証された。すなわち、数値解析法及び各種の解析条件にさえ問題がなければ、本論文で用いた数学モデルによってかなり高い現象再現精度が期待できることが確められた。

数値解析法について述べれば、explicit法では精度の向上が確実に認められるが、partial implicit法は余り精度の向上に関係がなく、むしろ、簡便法と比べて問題が残るところもあり、さらに今後の改良が必要であろう。一方、簡便法による結果は、洪水時及びその直後の期間における水表面濁度など、精度的に劣る面はあるが、全体としてみれば実用上支障がない程度の精度は得られていると考えられる。したがって、簡便法による計算が、安定条件の厳しいexplicit法、partial implicit法に比べ、それぞれ約1/100、1/10の計算時間で済むことに加え、解析に必要な諸条件には、厳密な計算を行うに十分なものとはいえない面がある現状を考えれば、水温、濁度等の年間変化を求めるような長期間の解析にあたっては、簡便法による方が実用的であり、精

度的にも十分なものが期待できると考えられる。

以下には、4.2.に述べた各貯水池を対象に、この簡便法を用いて、数学モデルを適用した結果を述べていくことにする。

#### 4.4.2. 早明浦貯水池における予測結果

表-4-2に示した入力資料及び計算条件のもとで数値解析を実施して得られた結果を、流出水温、流出濁度ならびにダム直上流部での水温、濁度分布で示したものが図-4-24～26である。なお、これらは、4.3.3.で述べた検討結果に基き、 $\Delta x=1000\text{ m}$ 、 $\Delta z=2\text{ m}$ として計算した結果である。

図-4-24に示した流出水温の計算値は、1月～2月の冷却期及び4月末～5月にかけての水温上昇期を除くと実測値とほぼ一致しており、また、図-4-25に示した流出濁度の計算値も、7月～9月の期間における不一致はあるが、一年を通じてみれば実測値と比較的良く一致しているといつてよいであろう。

一方、図-4-26の各分布結果をみると、水温は7月及び9月の成層低下時における計算値が、実測値と余り良い一致を示していないことを除けば、ほぼ良好な結果が得られているのに対し、濁度の計算値は、分布形の再現という定性的な面においては比較的良好であるが、値自体は実測値より大きいところが少ない。なお、こうした計算値が示す傾向は、4.3.3.で示した図-4-16と図-4-17との比較においてもみられるものである。

以上より、早明浦貯水池における解析結果は、洪水期間及びその直後など、部分的に問題は残されているが、年間を通じてみれば、水温及び濁度の平均的挙動を比較的良好に説明していると

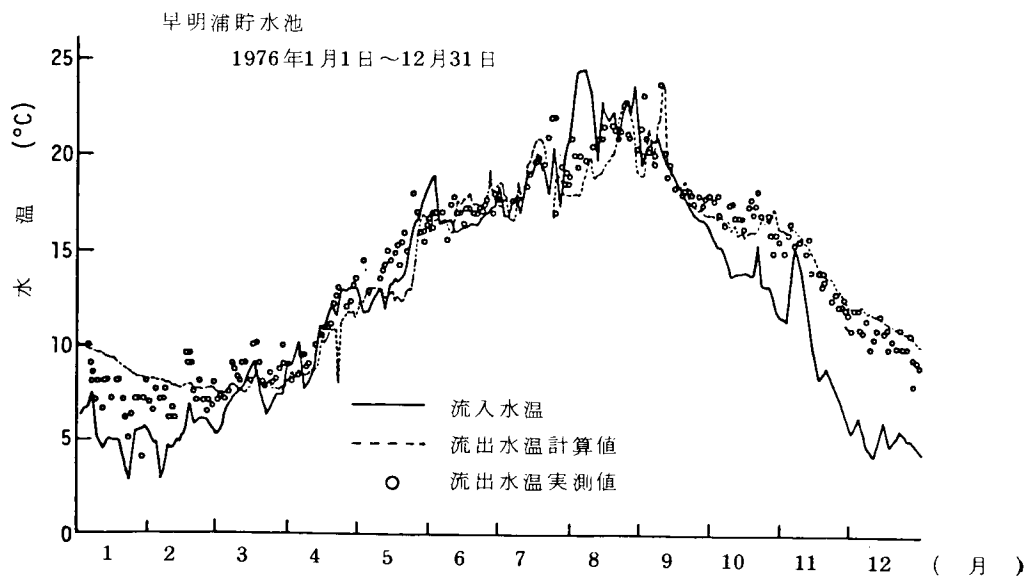
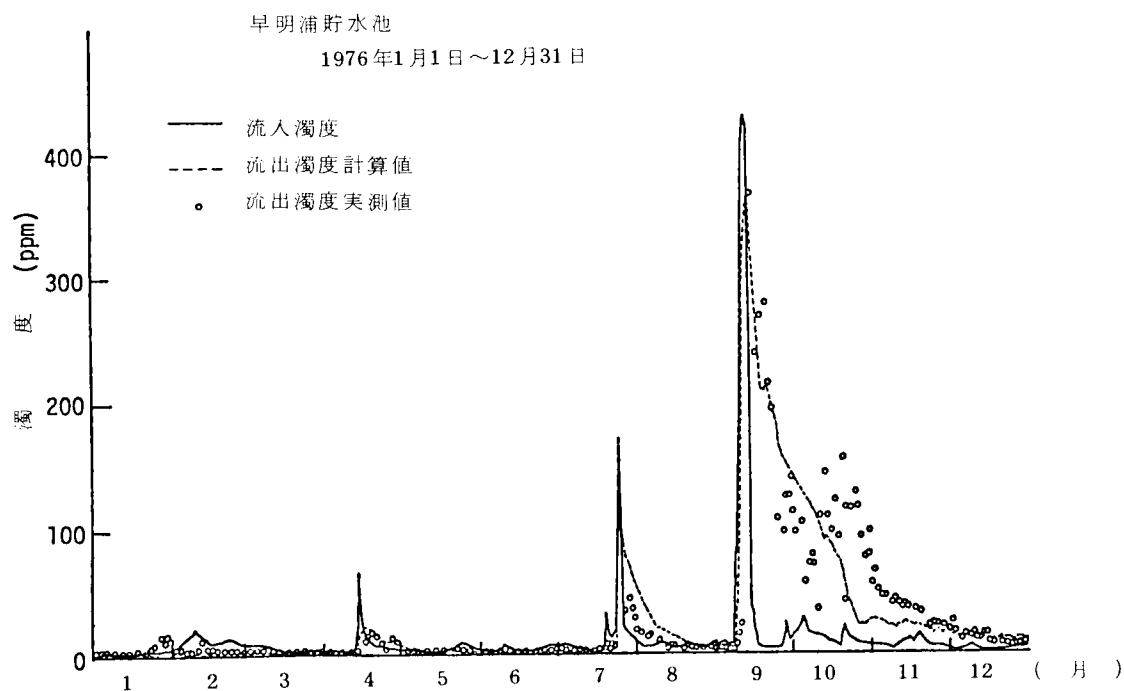
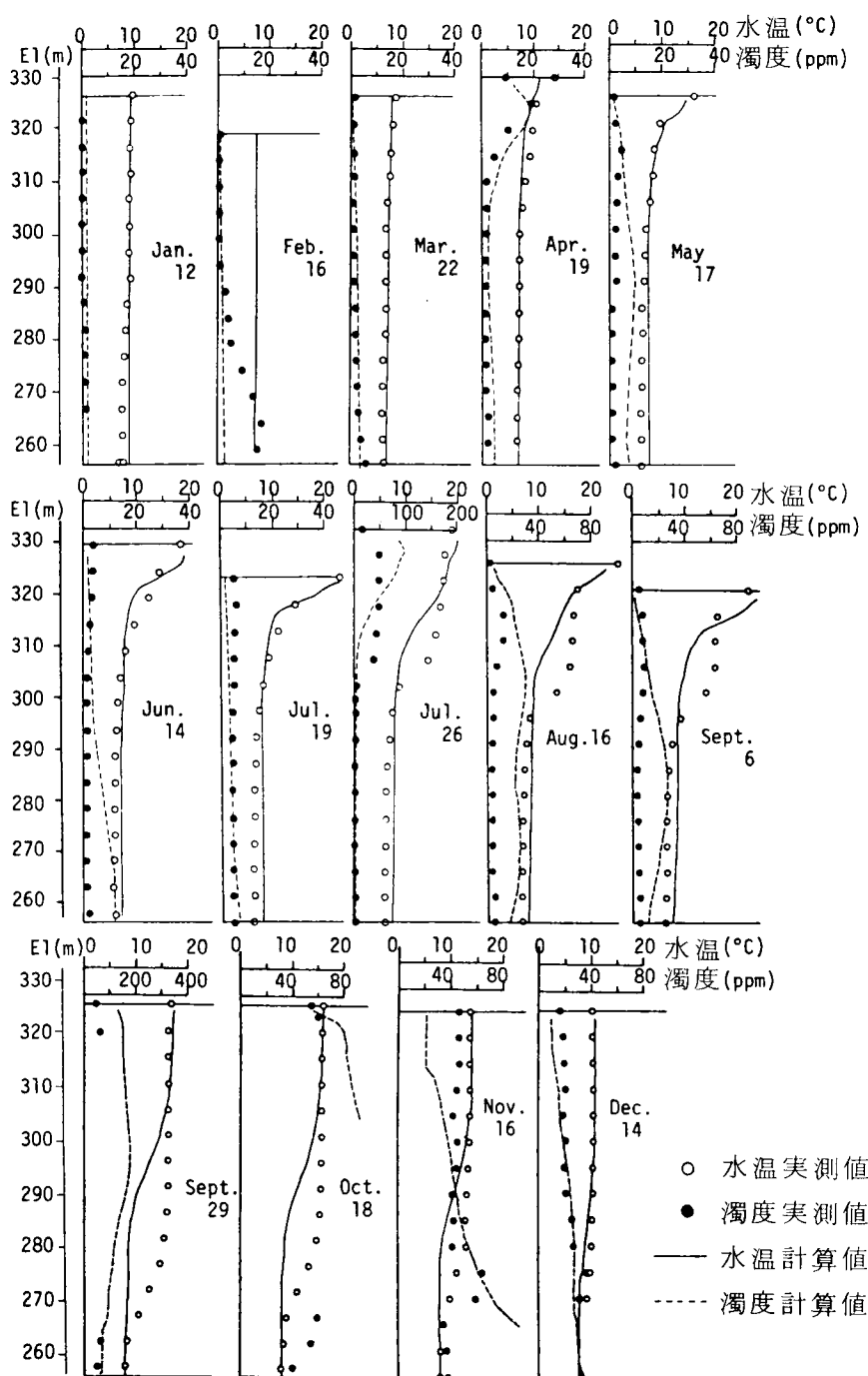


図-4-24 早明浦貯水池における流出水温の再現結果



図—4—25 早明浦貯水池における流出濁度の再現結果

考えられる。計算値と実測値との不一致は、水面勾配を省略し、流れを単純化したことにもよるが、洪水期間中における流入濁度など入力資料の不備に伴う諸条件の設定及び仮定に、不適当な部分があったことも大きな原因の一つと考えられる。とくに、洪水時の成層低下や濁水の流入・伝播過程など、短い時間スケールの現象を再現するためには、その時間スケールに対応した詳細な資料が必要である。したがって、これらの問題点を解決するためには、まずより詳細な実測、資料の収集、整備を進めることが肝要であり、数学モデル及び数値解析法の改良を今すぐ考える必要はないであろう。



図—4—26 早明浦貯水池における水温・濁度分布の再現結果

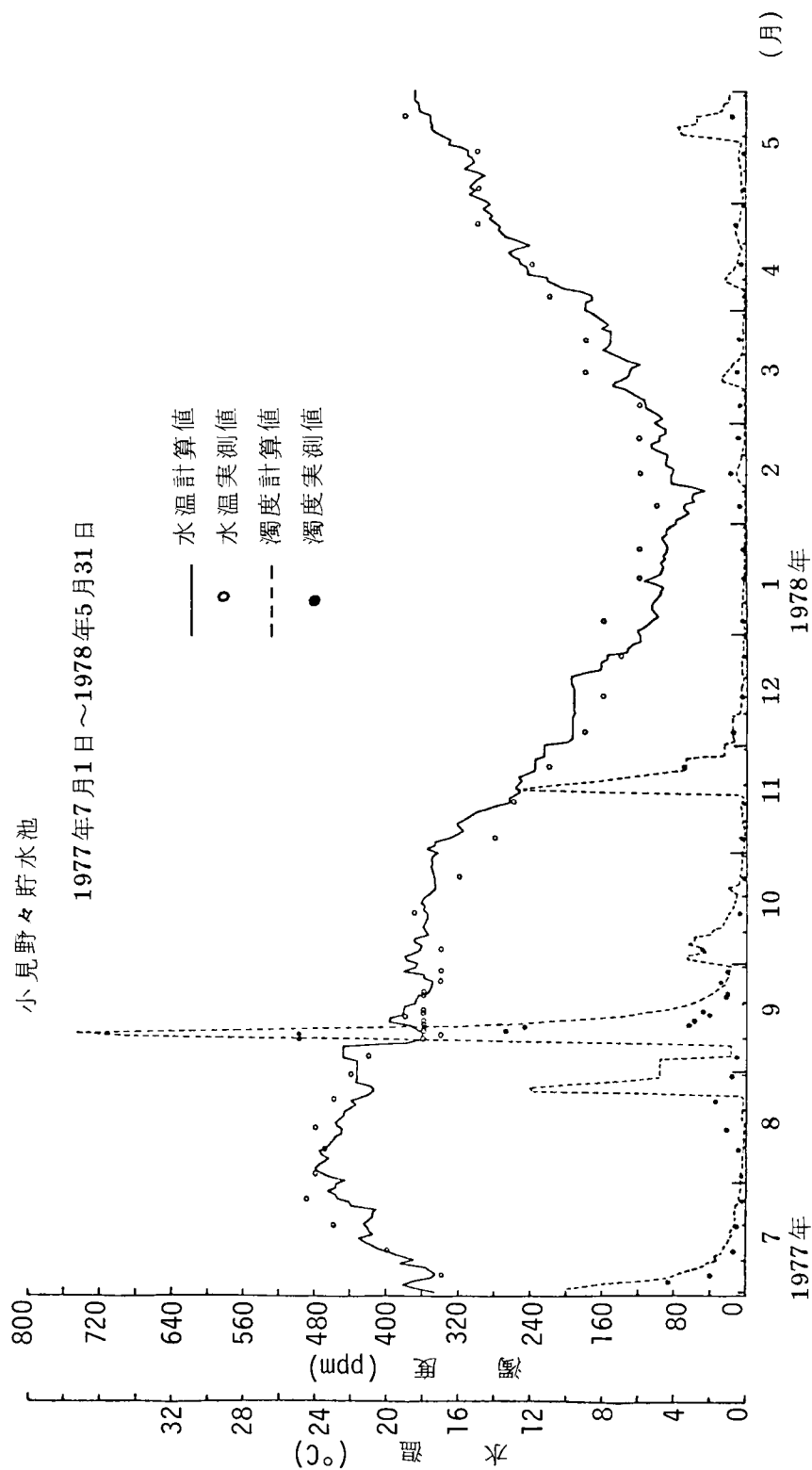


#### 4.4.3. 小見野々、長安口及び川口貯水池の3貯水池系における予測結果

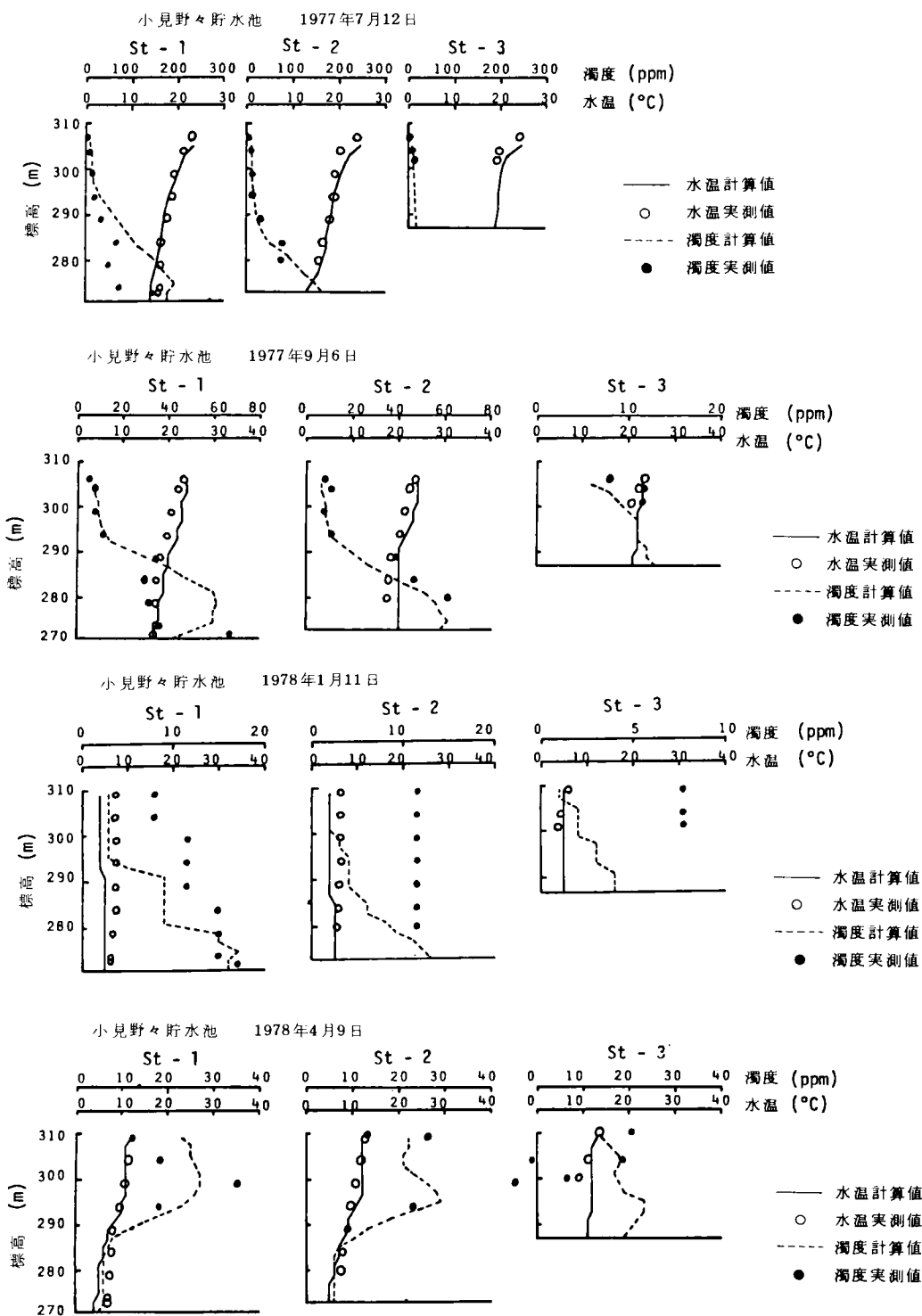
4.2.の2)に述べた那賀川水系小見野々、長安口、及び川口貯水池を対象に、表-4-4~5に示した諸条件のもとで水温及び濁度の数値解析を実施した結果について述べる。この解析は、貯水池規模及び水理・水文的性格の異なる3貯水池系を対象に、上流側より順次解析を進めていったものであり、長安口及び川口貯水池への流入水温及び濁度は、それぞれ上流に位置する貯水池よりの流出水温、濁度の計算値が用いられている。

まず、最上流に位置する小見野々貯水池における計算結果を、流出水温及び濁度ならびに各季節の水温・濁度分布に関して実測値と比較したものが図-4-27, 28である。図-4-27の結果より、流出水温、濁度の計算値は実測値の変化をほぼ良好に再現していることがわかる。ただし濁度に関しては、洪水時のピーク値及びその後の低減期間における値に実測値との不一致がみられるところもあるが、これらの期間では実測資料がないため流入濁度及びその粒度分布を仮定せざるを得なかったことを考えれば、こうした不一致もある程度はやむを得ないであろう。一方、図-4-28に示した計算例をみると、水温分布の計算値はいずれも実測値と良好に一致しているのに対し、濁度のそれは昭和52年7月及び9月の例はともかくとして、昭和53年1月及び4月の例では実際の分布を余り良く再現しているとはいえない。これは上述した入力資料の不備に起因すると同時に、対流混合現象及びそれに伴う濁質の再浮上の取扱いや流れを単純化した計算法に起因するものと考えられ、これらの点を改めれば、精度の向上を図ることは可能であろう。

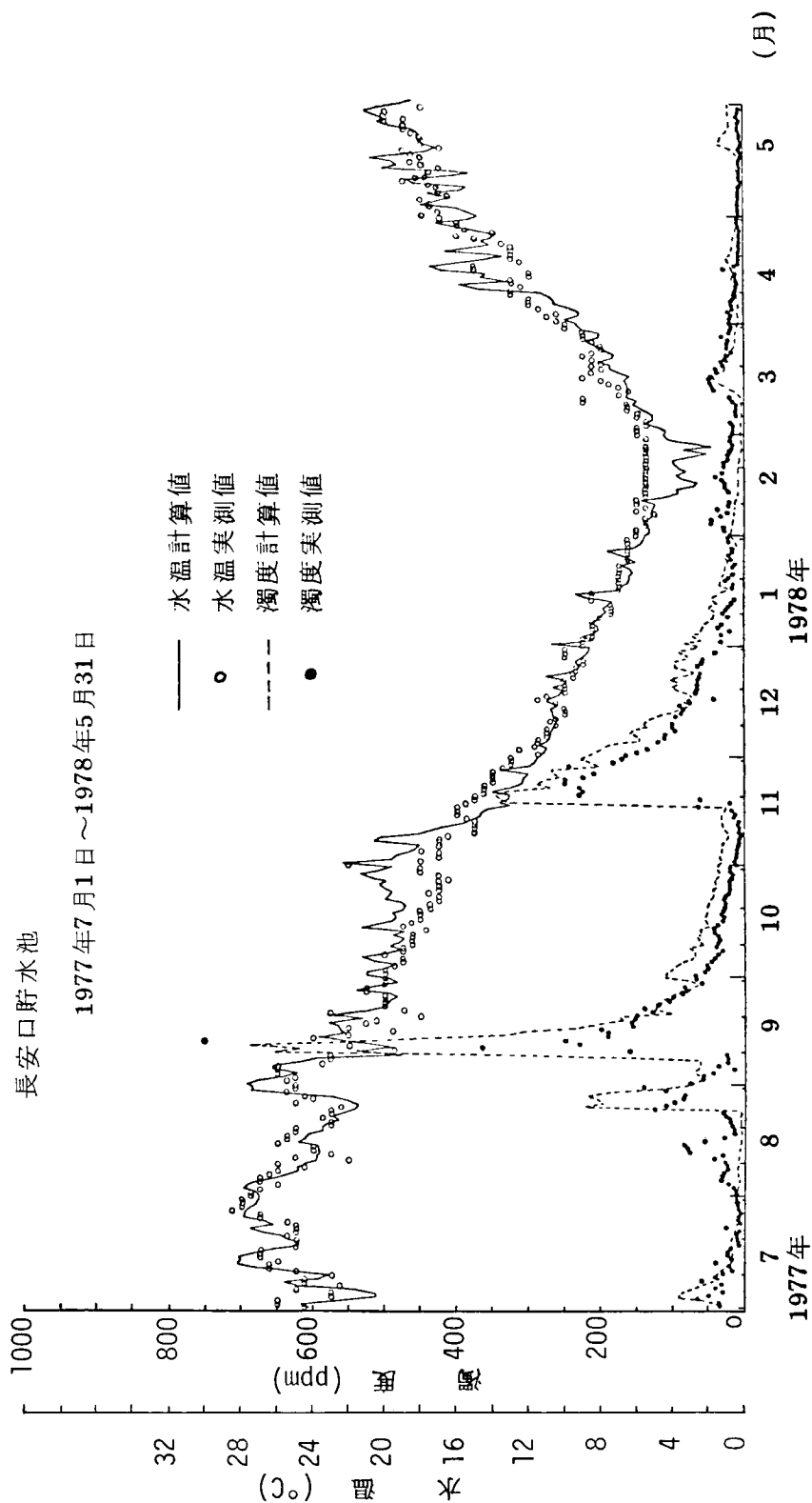
次に、長安口貯水池における結果を、ダム直上流部の表面水温及び濁度の時間的变化及び各季節の水温・濁度分布例で示したものが、図-4-29, 30である。長安口貯水池においては流出水温及び濁度に関する資料がないため、水表面における値で、実測値との比較を行っている。図-4-29に示した水温の計算値は、気象要素の影響による変動がやや大きくあらわれているが、比較的良好に実測値を再現しているといえよう。昭和52年10月下旬から11月上旬にかけての期間と昭和53年2月中旬から下旬にかけての期間における計算値と実測値との不一致は、図-4-27に示した小見野々貯水池よりの流出水温に関する不一致と対応するものである。濁度についても、各ピーク時ならびに河川工事等の人為的影響があった（小見野々貯水池上流部及び支川坂州木頭川において）<sup>3)</sup>昭和52年8月中旬を除けば、水温同様、所要の再現精度が得られていると考えてよい。また、図-4-30の各分布例でも、各計算値は、ほぼ十分な再現精度を示しているが、昭和52年7月19日及び昭和53年5月25日の濁度分布に関しては、濁度ピークの再現に問題が残されている。すなわち、7月19日の計算値では濁度ピークが表わされず、5月25日のものは定性的にはピークの存在を示しているがその値自体は実測値と一致していない。これらの例にみられる変水層での濁質の貯留は、取水口へ向かう流れとそれに伴う乱れの影響によって濁質の沈降が阻害される結果であるとされている<sup>9)</sup>。しかし、濁質の性状や乱れの強さ及びその分布が十分に明らかでない現状においては、こうした影響を正しく把握することは容易でない。した



図一4—27 小見野々貯水池における流出水温及び濁度の計算結果



図—4—28 小見野々貯水池における水温及び濁度分布の計算例



図一4—29 長安口貯水池における表面水温及び濁度の計算結果

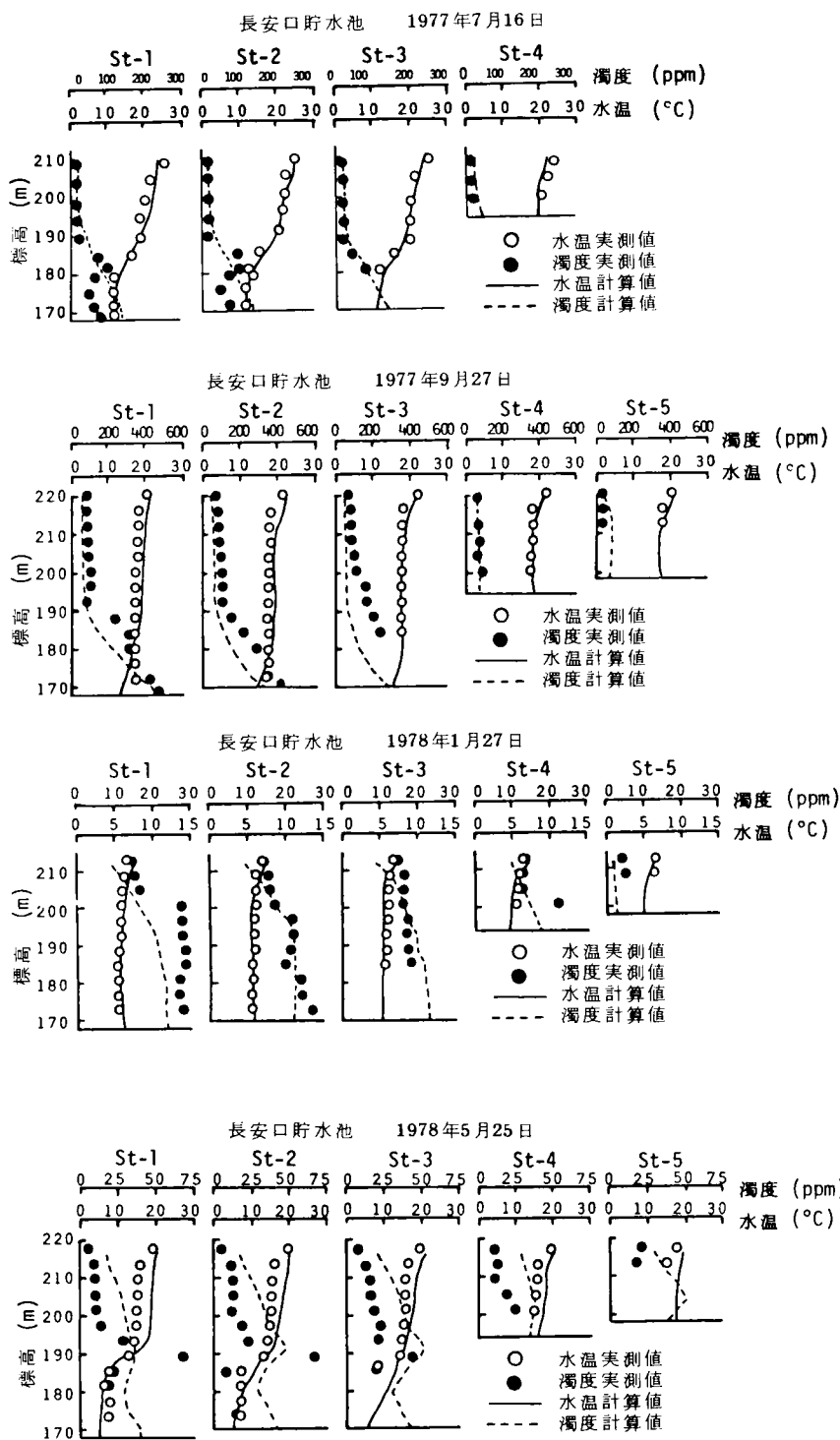


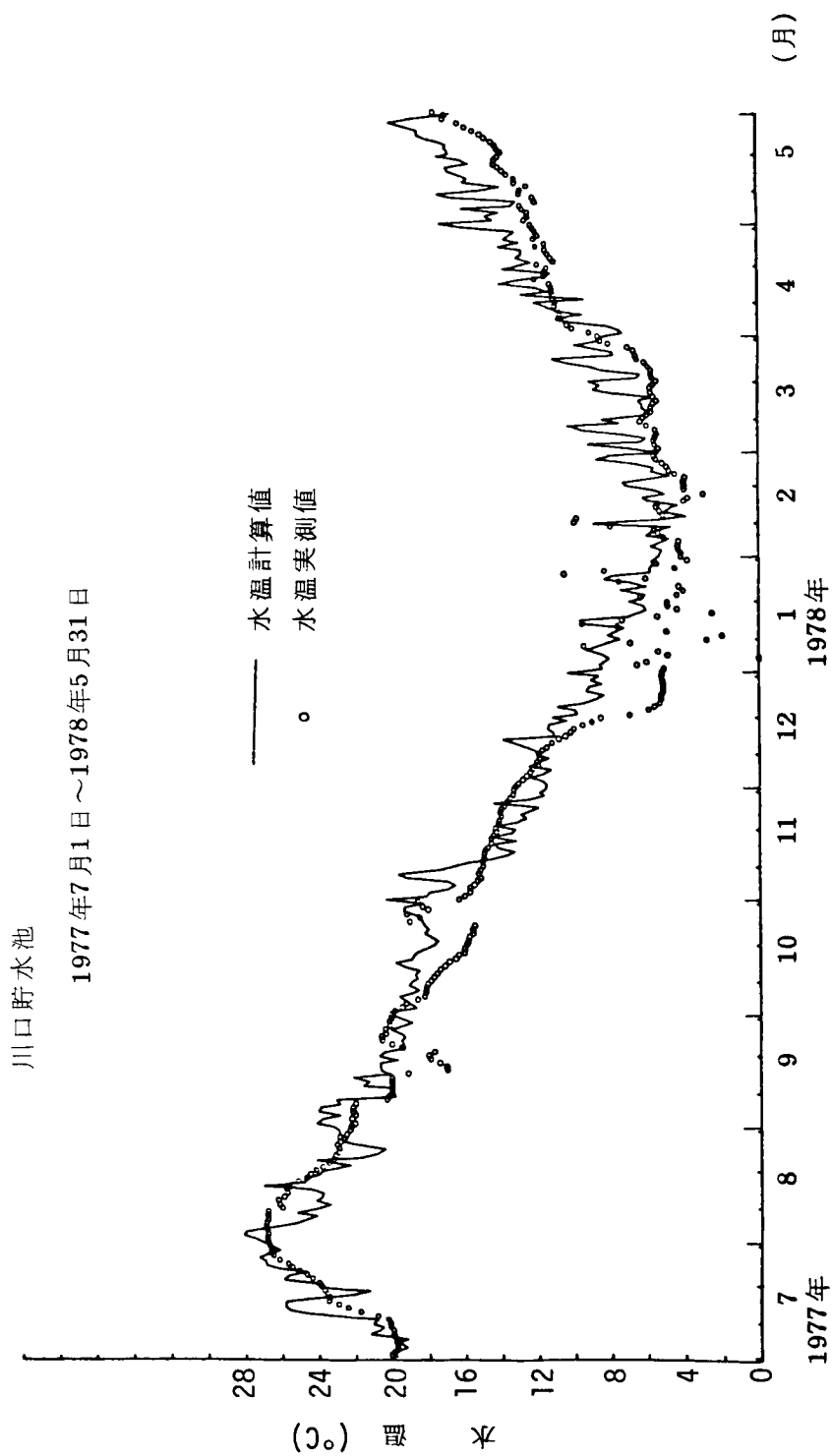
図-4-30 長安口貯水池における水温・濁度分布の計算例

がって、より計算精度の向上を図るためには、こうした点の解明が一つの課題であろう。もちろん、現実の高濁水層の厚さに応じて、水深方向の分割をさらに細かくすることは当然必要となるであろう。

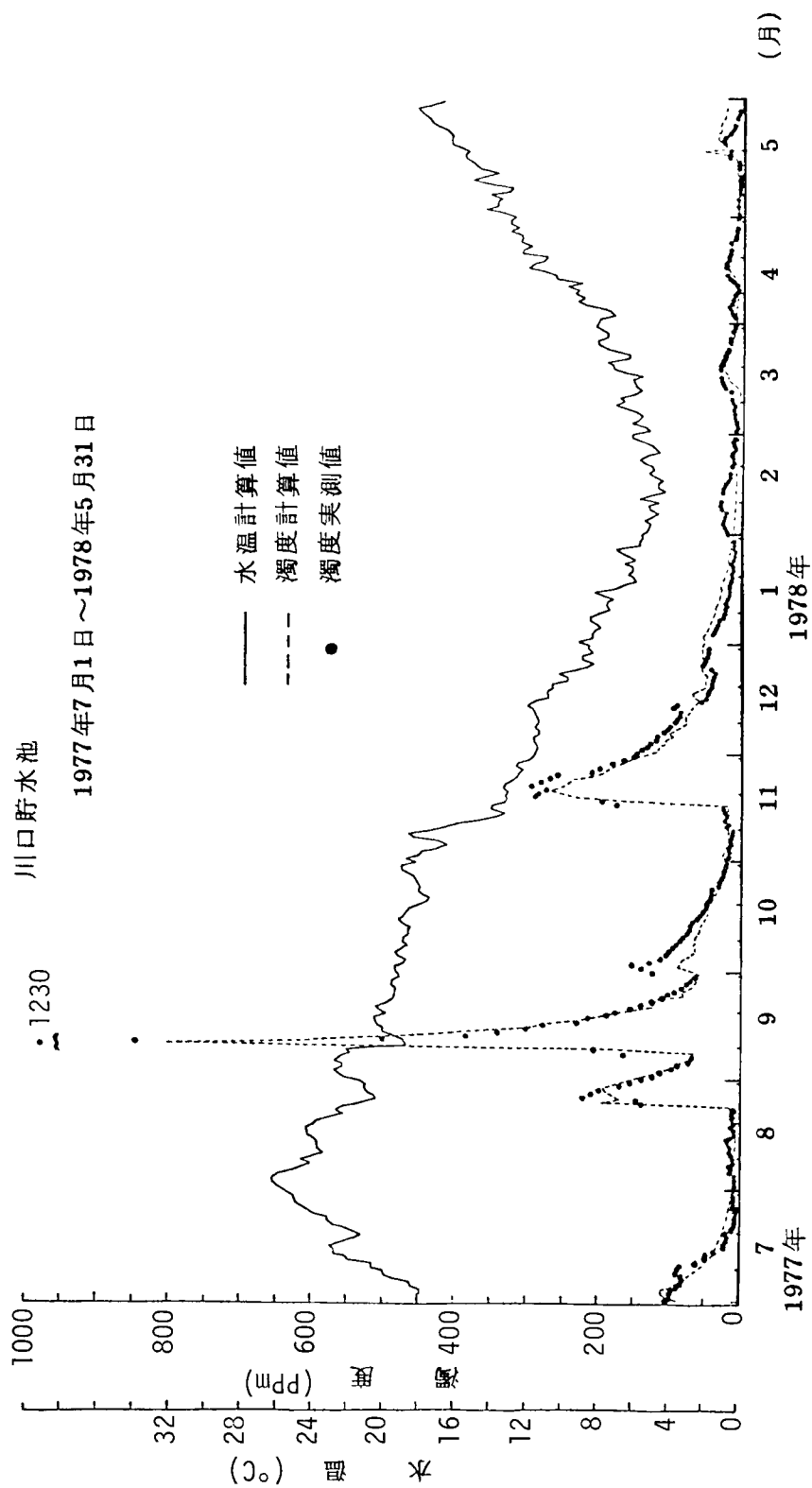
最後に、川口貯水池における解析結果を示すと、図-4-31～33 のようである。図-4-31 はダム直上流部における水表面温度の結果であり、図-4-32 は取水口からの放流水温、濁度のそれである。また、図-4-33 は各季節での水温及び濁度分布である。図-4-31 より、表面水温の計算値は、実測値に比べ変動が激しく、また、上述した小見野々及び長安口貯水池における計算値と実測値との不一致期間（10月下旬～11月上旬）や、12月下旬～1月下旬にかけての冷却期ならびに4月下旬～5月下旬の昇温期においては実測値と余り良い一致を示していないことがわかる。これらの不一致は、主として大気との熱交換による水温変化を正しく評価し得なかったことに加え、境界条件としての流入水温の把握、すなわち本川では計算値による再現、支川ではその仮定に問題があったことに起因するものと考えられる。大気との熱交換フラックスに関しては、貯留水の混合の程度が大きい川口貯水池の水理条件が、微妙に影響していることも考えられ（計算では熱交換フラックスへの流れの影響は考慮していない）、より再現精度の向上を図るためには、そうした点の検討も必要となるであろう。一方、図-4-32の濁度変化の結果は、きわめて良好であり、これまでに述べてきた小見野々、長安口及び川口貯水池での一連の解析によって、ほぼ現実に近い濁度の追跡が行い得たことを示すものといえよう。図-4-33においては、水温及び濁度の各計算値が、実測値と同様に、水深方向にほぼ様な分布を示し、混合型貯水池における特徴を表わしているが、値自体については、実測値と一致しないところもみられる。

以上が、小見野々、長安口及び川口の各貯水池における水温及び濁度の挙動に関する一連の解析結果である。これらの3貯水池は、貯水池の規模や水理学的性格がそれぞれ異なるものではあるが、いずれにおいても所要の現象再現精度が得られており、解析に用いた数学モデル及び数値解析法の妥当性、有効性及び汎用性が実証されたと考えてよいであろう。また、表-4-4～5に示した各種の解析条件についても、ほぼ妥当なものであったといえよう。

もちろん、洪水時及びその直後における期間など、現象の時間的・空間的スケールが比較的小さいときの、水温及び濁度の挙動をより詳細に、より精度良く知るためには、各スケールに応じたより細かい貯水池分割と入力資料が必要であると同時に、4.4.1.で述べたような水面勾配を省略しない厳密な計算をしなければならないことはいうまでもない。また、計算結果に大きな影響を与える流入水温、流入濁度及び気象要因による熱交換フラックスなど環境境界条件の正確な把握と、対流混合、分散係数、濁質の性状及びその沈降特性等の不確定要素の解明も、貯水池水理をより明らかにするために必要な今後の研究課題である。



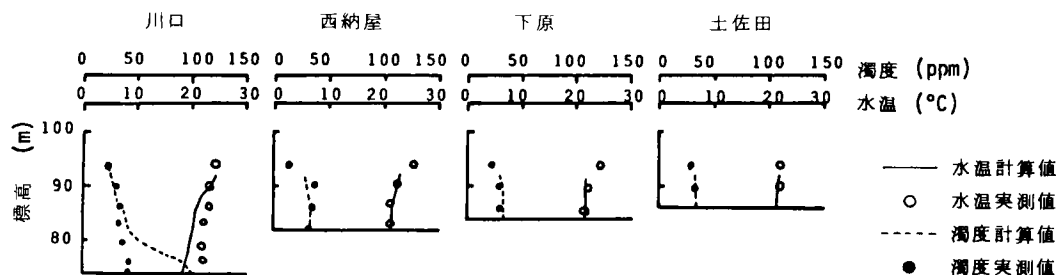
図—4—31 川口貯水池における表面水温の計算結果



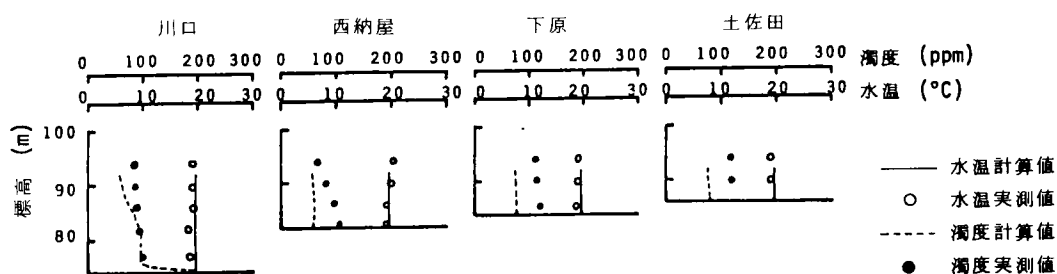
図一4—32 川口貯水池における流出水温及び濁度の計算結果



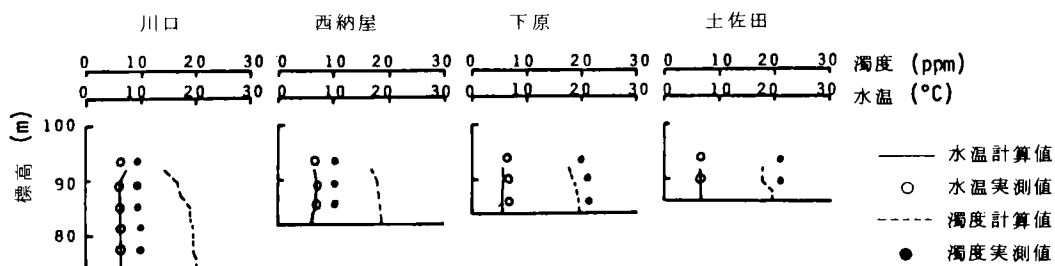
川口貯水池 1977年7月16日



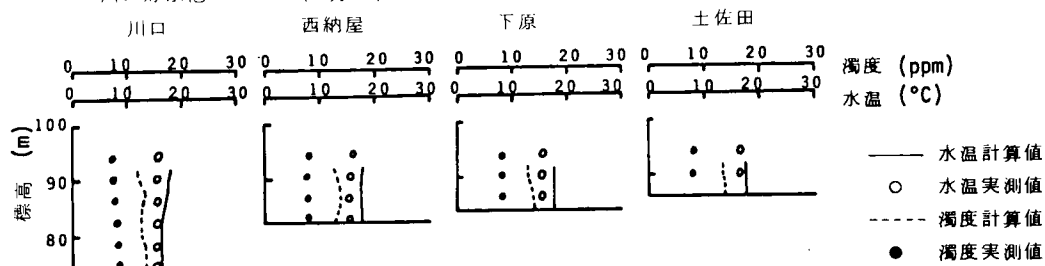
川口貯水池 1977年9月27日



川口貯水池 1978年1月27日



川口貯水池 1978年5月25日



図一4-33 川口貯水池における水温及び濁度分布の計算例

## 参 考 文 献

- 1) 建設省河川局；吉野川濁水対策報告書(3)，貯水池及び河川濁度解析，1978.
- 2) 徳島県・防災研究協会；那賀川濁度追跡調査業務報告書，1978.
- 3) 徳島県・防災研究協会；昭和53年度那賀川濁度調査業務委託報告書，1979.
- 4) 岩佐義朗；那賀川における濁度の追跡，徳島県那賀川河口養殖ヒトエグサ等被害原因調査報告書，日本水産資源保護協会，1977，pp.159～251.
- 5) 岩佐義朗・松尾直規・井上素行；貯水池における濁度解析について，京都大学防災研究所年報第21号－B，1978，pp.319～329.
- 6) 岩佐義朗・松尾直規・遠藤正昭；洪水時における貯水池の成層破壊について，京都大学防災研究所年報第20号－B，pp.259～270.
- 7) 松尾直規・岩佐義朗・小林正典・川那部嘉彦；貯水池水理の空間的スケールからみた解析法の考察，第25回水理講演会論文集，1981，pp.609～616.
- 8) 岩佐義朗・松尾直規・俞朝夫；貯水池水理の数値解析法とその適用について，京都大学防災研究所年報第22号－B，1979，pp.341～354.
- 9) 安芸周一・白砂孝夫；貯水池濁水現象の調査と解析（その1），貯水池の流動形態と濁水現象，電力中央研究所報告 74505，1974.

## 第5章 貯水池における富栄養化の予測<sup>1)~4)</sup>

### 5.1. 概 説

貯水池における富栄養化は、今日、貯留水の水質悪化に関する問題として、緊急に対策を要する重要な研究課題の一つとなってきた。このため、従来よりの陸水学や生態学の分野のみならず、水工学の分野でもその工学的対策の樹立を目指して、各種の調査研究ならびに予測手法の開発が鋭意進められるようになったが、定性的なことはともかくとして、定量的には十分明らかでないのが現状である。とくに、富栄養化過程における植物プランクトンを中心とした生物学的生産・消費機構の解明が十分に行い得ないこと、さらに、貯水池が自然湖沼と異なり、1.1.及び1.2.で述べたような特有の水理・水文の特徴を有しているため、流出入条件の変化に伴う貯留水の運動学的挙動及びその水温分布の挙動が富栄養化に関係する各種水質濃度の変化に複雑な影響を及ぼしていることが、現象の予測ならびにそれに基づく工学的対策の効果の評価を一層困難にしている。

貯水池における富栄養化の予測法には、2.2.及び2.6.1.で概括したように、Vollenweider<sup>5)</sup>に代表される巨視的な方法と、貯水池内での植物プランクトンや栄養塩等の濃度変化を擬似構造モデルにより求める方法とがあるが、貯水池を囲む環境境界条件の変化に応じて、各種水質濃度がどのような挙動を示すかを予測し、富栄養化対策のための技術的資料を得るためには、後者の方法を用いる必要がある。しかも、上述したような貯水池の特殊事情を考えれば、各種水質濃度の変化とそれに寄与する流れの運動学的挙動ならびに水温分布とを同時に取り扱うものが要求される。

本章では、2.6.において以上の観点より開発された貯水池の富栄養化予測のための数学モデルを、実際の貯水池に適用し、現実の諸条件のもとで各種水質濃度の変化を予測していくつかの例を示し、モデルの妥当性や有効性を検討するとともに、富栄養化過程ならびに関係する諸要素の影響を水理学的に考察する。さらに、より高度の予測法の開発とその適用結果についても考察される。

### 5.2. 対象貯水池における入力資料及び解析条件

本章で対象とした貯水池は、木津川支川、宇陀川中流部に位置する室生貯水池である。室生貯水池は、洪水調節、灌漑、上水道用水取水を目的として建設された多目的貯水池であるが、流域からの窒素、リン等栄養塩物質の流入によって富栄養化の進行が著しく、上水道用水（奈良県上水道）に異臭味が発生し、大きな社会問題となっているところでもある。このため、早急な対策

の樹立とそのための富栄養化解析及び予測が要請されている。

室生貯水池及びその流域の概要は図-5-1に示すようであり、ダム地点での集水面積は約136km<sup>2</sup>、さらに、島谷取水路を通じて流入する室生川の流域まで含めると、その面積は約169km<sup>2</sup>である。流域内では、農業、林業及び畜産業、さらには皮革加工業、木材加工業が盛んである<sup>6)</sup>。室生貯水池の諸元は、表-5-1に示すようであり、総貯水容量1670万m<sup>3</sup>、有効貯水容量1430万m<sup>3</sup>の比較的小規模な貯水池である。しかし、貯水容量に対する流出入流量の比は小さく（昭和50年では $\alpha = 6.6$ ）、水理・水文的性格の分類からいえば、成層型貯水池に属する。貯水池中央部には、図-5-1よりわかるように、奈良県桜井浄水場へ通ずる初瀬導水路取水口があり、最大1.6m<sup>3</sup>/secの取水が行われていると同時に、ダム上流部には、室生川より島谷取水路を通じて最大2.0m<sup>3</sup>/secの導水が流入している。一方、ダムでは、常時水面下3mの位置より表層取水が実施され、洪水時には敷高標高282mにある洪水吐より洪水調節のための放流操作が行われる。

貯水池の幾何形状は、図-5-2、3に示すようであり、図-5-3に同じく図示した各地点において、水温及び各種水質濃度の観測がほぼ月に1回程度の間隔で実施されている。1.5.で図-1-30～32に示した等水温線図ならびに等濃度線図は、こうした観測資料に基くものであ

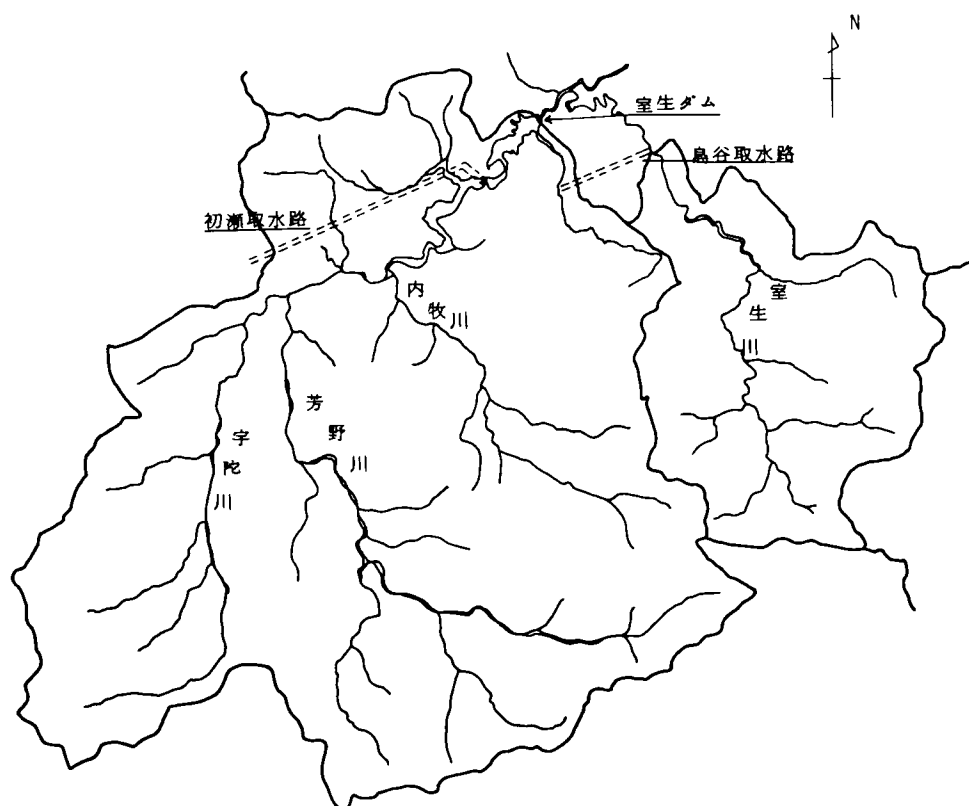
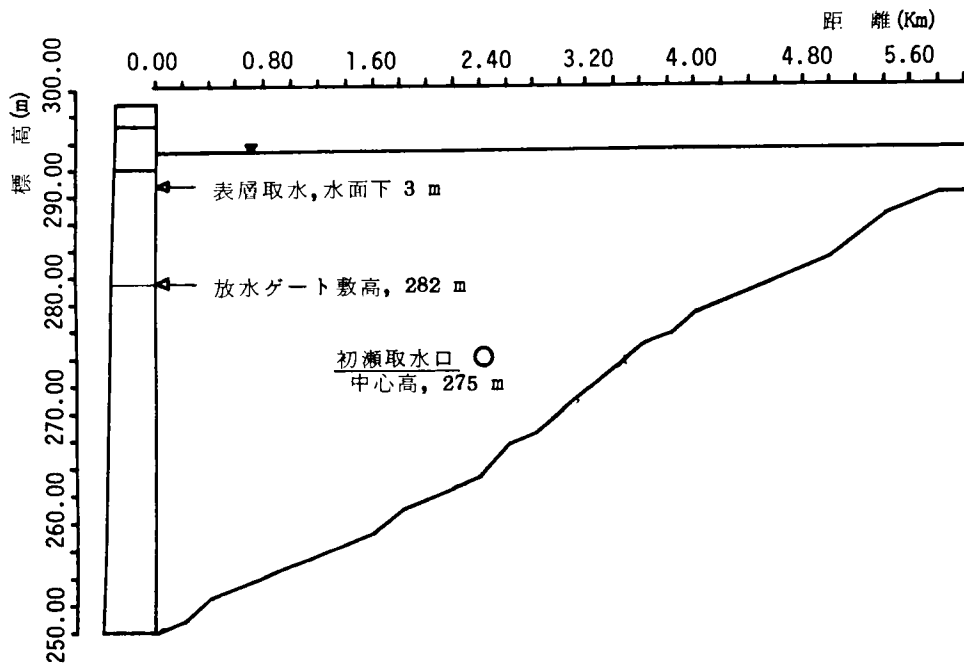


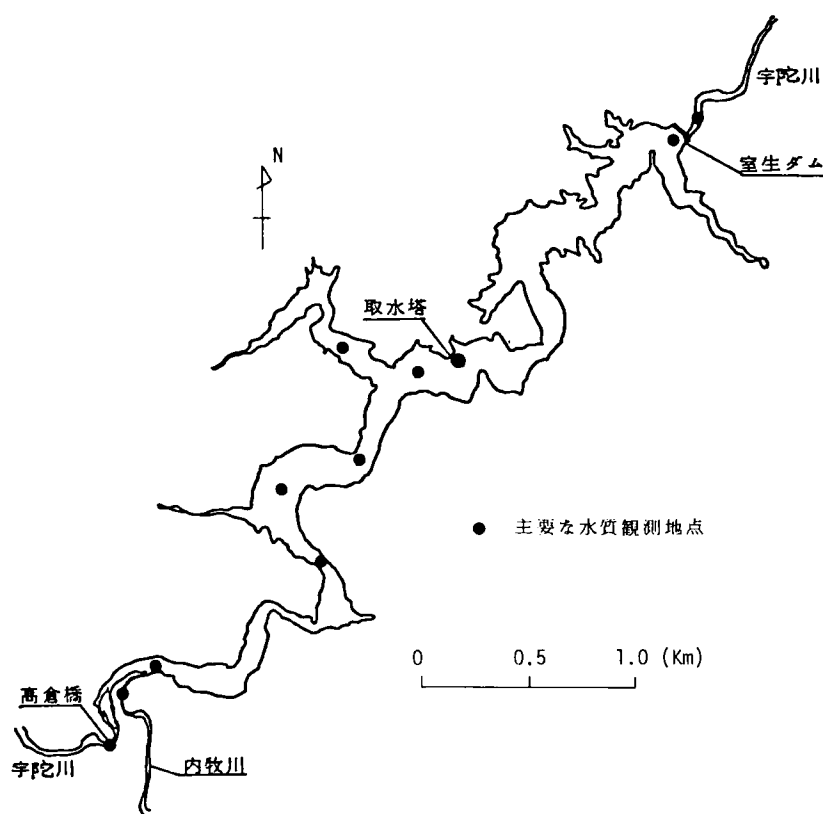
図-5-1 室生貯水池流域図

表一 5 - 1 室生貯水池の諸元

河 川 名	淀川水系名張川支川宇陀川
位 置	奈良県宇陀郡室生村大野
集 水 面 積	直接 136 km <sup>2</sup> 間接 33 km <sup>2</sup> 計 169 km <sup>2</sup>
地 質	室生火山岩
形 式	重力式コンクリートダム
堤 高	63.5 m
堤 頂 長	175 m
堤 体 積	153,000 m <sup>3</sup>
湛 水 面 積	1.05 km <sup>2</sup> (貯水池距離 5.8km)
総 貯 水 量	16,900,000 m <sup>3</sup>
有 効 貯 水 量	14,300,000 m <sup>3</sup>
洪水調節用放水設備	ラジアルゲート 3 門 最大放流量 1,600 m <sup>3</sup> /S
利用施水設備	ホロージェットバルブ 1 門 最大放流量 11 m <sup>3</sup> /S



図一 5 - 2 室生貯水池縦断面図



図－５－３ 室生貯水池の平面形状と水質観測地点

り，それらの特徴は，既に述べたとおりである。

以上が対象とする室生貯水池の概要であり，これに基づいて室生貯水池における富栄養化の解析が進められることになる。富栄養化に関係する流れの運動学的挙動，水温及び各種水質濃度の挙動は，(2-9)～(2-13)式及び(2-30)～(2-34)式等に示した数学モデルを3.2.2.に述べた Runge-kutta 法を用いて数値解析することによって求められる。室生貯水池を対象とした解析にあたっては，表－５－２に示すような入力資料及び各種の解析条件のもとで，これらの水理量の変化を計算する。なお，各種水質濃度の化学的，生物学的生産・消費に関係する諸定数の値は，表－５－３のように定めている。これらの値は，実験結果等に基づき従来より慣用されている値の範囲内で，試行計算によって適当に調整された後のものである。

さて，表－５－２に示した解析条件のうち，主要な点について説明すると，次のようである。

#### 1) 各種水質濃度の流入条件

無機態及び有機態窒素，総リンの濃度あるいは負荷量は，流入負荷量（貯水池上流高倉橋における実測濃度と貯水池流入流量との積）と貯水池流入流量との関係を示した図－５－４～６より，濁度の場合と同様に，次式で推定する。

表一五—2 室生貯水池における水理解析条件及び入力資料

項	目	項	目
1. 計算対象流況	<ul style="list-style-type: none"> <li>• S. 52. 1. 25 ～ S. 53. 1. 31</li> </ul>	動物プランクトン： $L = 0$	
2. 貯水池形状	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 各標高の平面積及び湛水長は図面計測</li> </ul>	無機態窒素： $L = 109.5 Q_{in}^{0.970}$	
3. 気 象	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 気温、湿度、風速、雲量：最寄りの上野測候所の日平均値</li> <li>• 日射量：欠測のため上野測候所の日平均日照時間資料より換算</li> </ul>	有機態窒素： $L = 32.17 Q_{in}^{1.063}$	
4. 流入流量	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 貯水池管理月報による日平均値</li> </ul>	全 リ ン 量： $L = 12.40 Q_{in}^{1.004}$	
5. 放 流 量	<ul style="list-style-type: none"> <li>• クレスト越流量（敷高 EL 282m）</li> <li>• 発電取水量（水面下 3m からの表層取水） いずれも貯水池管理月報による日平均値</li> </ul>	8. 初 期 条 件	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 流速：初期値設定計算による値</li> <li>• 水温及び各種水質濃度：S. 52. 1. 24 の実測値</li> </ul>
6. 流入水温	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 実測値（日平均） なお島谷取水の水温は本川に同じ</li> </ul>	9. $\Delta x, \Delta z, \Delta t$ の値	
7. 流入水質負荷量	<ul style="list-style-type: none"> <li>• クロロフィル a：<math>L = 0.3456 Q_{in}</math></li> </ul>	$\Delta x = 1000 \text{ m}$	
		$\Delta z = 1 \text{ m}$	
		$\Delta t$ は安定条件より定まる値 ただし最大でも 0.1 日	
		10. その他の条件	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 運動量、水温、濁度の分散係数（<math>D</math>） <math>D = Q_{out} \times 0.01 \text{ (m}^2/\text{day)}</math></li> </ul>
		水面反射係数 0.1	
		水面吸収率 0.5	
		日射量減衰係数 0.2	
		窒素、リンの溶出率：季節変動を仮定する	

表一五—3 化学的・生物学的生産・消費に関する諸定数の値

記号	係数値	記号	係数値
$\mu_C$	1.02	$a_Z$	0.6
$K_I$	0.04 (1/°C)	$K_Z$	0.002 (1/°C·day)
$I_S$	360(cal)	$K_O$	0.01 (1/day)
$K_N$	0.1 (mg/l)	$\beta$	0.01 (ppm-N/ppb-chla)
$K_P$	0.01 (mg/l)	$K_L$	$0.005 + 0.001 \cdot T$ (1/day)
$K_A$	0.005 (1/°C·day)	$\gamma$	0.2 (ppm-N/ppm-Z)
$C_g$	0.25 (1/mg·°C·day)	$v_{O,Cp}$	0.3 (1/day)
$K_{Cp}$	60 (ppb)	$v_{O,Ph}$	0.3 (1/day)
$\alpha$	0.05	$v_{O,No}$	0.3 (1/day)

$$L = aQ_{in}^b$$

(5-1)

ここに、 $L$ ；流入負荷量， $Q_{in}$ ；貯水池流入流量， $a$ ， $b$ ；定数である。

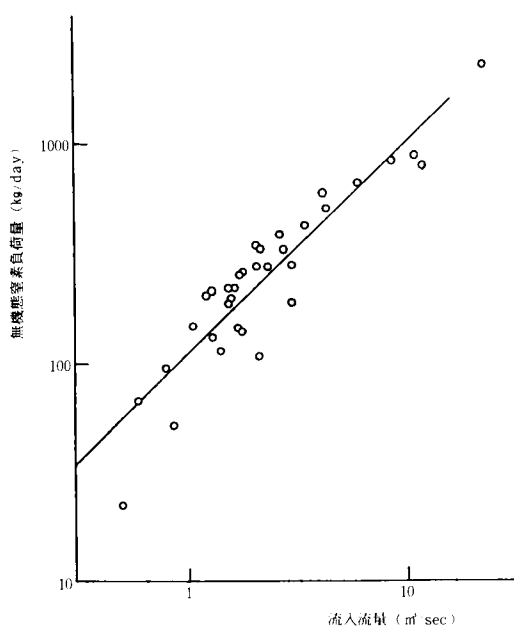
すなわち、表-5-2に示した関係式は、図-5-4～6より得られたものであり、図中の直線がそれらを表わしている。各図よりわかるように、無機態窒素及び総リンに対する流量と負荷量との相関は比較的高い（相関係数は前者が0.94，後者が0.92<sup>5)</sup>）が、有機態窒素に関しては、かなりのバラツキがみられ（相関係数0.76<sup>5)</sup>），その推定精度には問題が残されるが、他に適当な推定法がない現状においてはやむを得ないであろう。なお、有機態窒素にみられるこうした傾向は、負荷量のうち人為的要因によるものが大きいと考えられる。

一方、植物プランクトンの指標であるクロロフィルaについては、実測値が乏しく(5-1)式の関係を決めることができないと同時に、得られている実測値の範囲内では変動が比較的小さいことから、それらの平均値で与えることにする。また、動物プランクトンに関しては、河川より流入するものは無視しうると仮定し、流入負荷量を0とする。

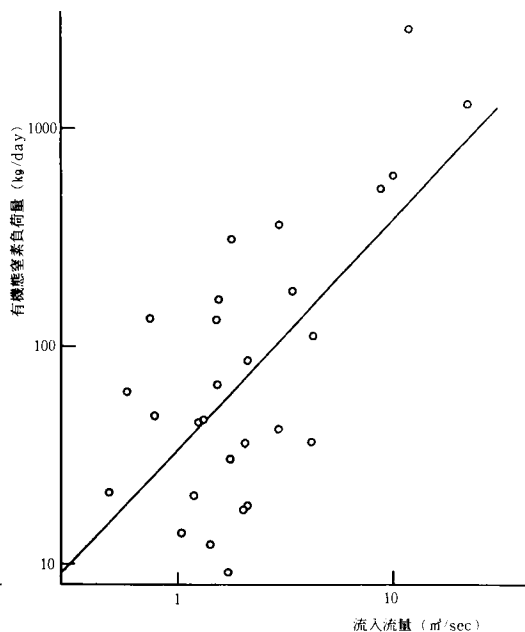
## 2) 無機態窒素及び総リンの溶出率

底泥からの窒素及びリンの溶出率については、底泥付近の化学的条件（DO濃度，pHなど）や物理的条件（水温，乱れの強さなど），さらには窒素，リンの底泥中における存在形態に影響されることが考えられるが、これらの諸要素との関係は未だ十分に明らかではない。しかし、一般に、水温が上昇し底泥付近の貯留水が嫌気性となる夏季には、無機態窒素及びリンの溶出が活発となり、深水域でのこれらの濃度が上昇する傾向が知られている。そこで、本解析では、図-5-7，8に示すような溶出速度の季節変動を考え、これによってそれぞれの値を与えることにした。

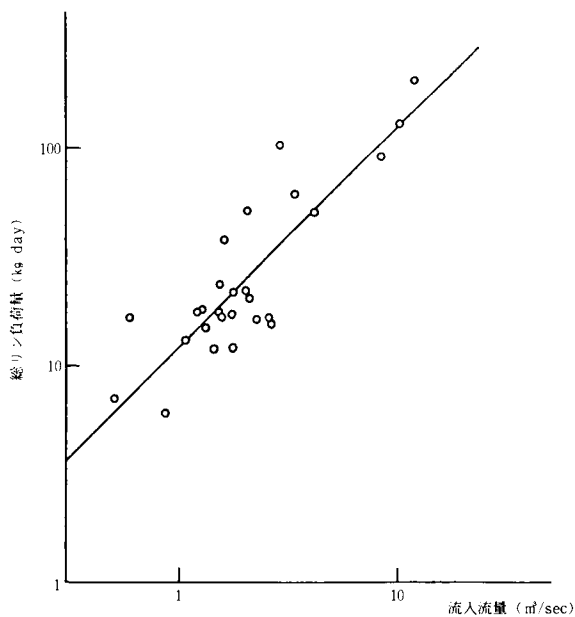




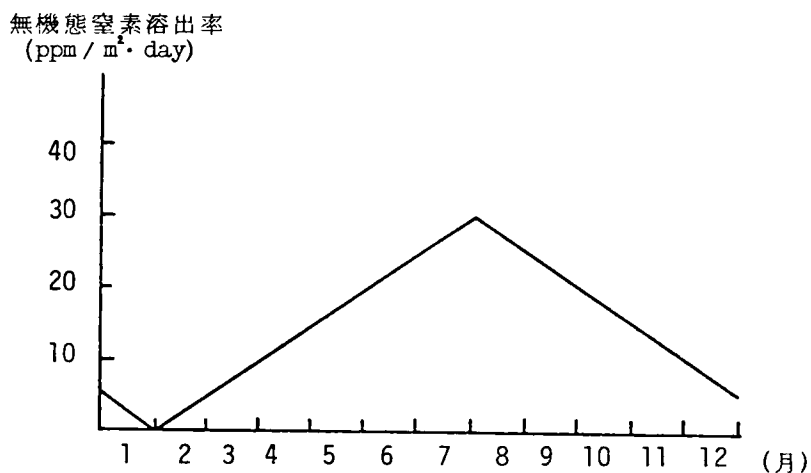
図一五—四 無機態窒素の流入負荷量と  
流入流量との関係



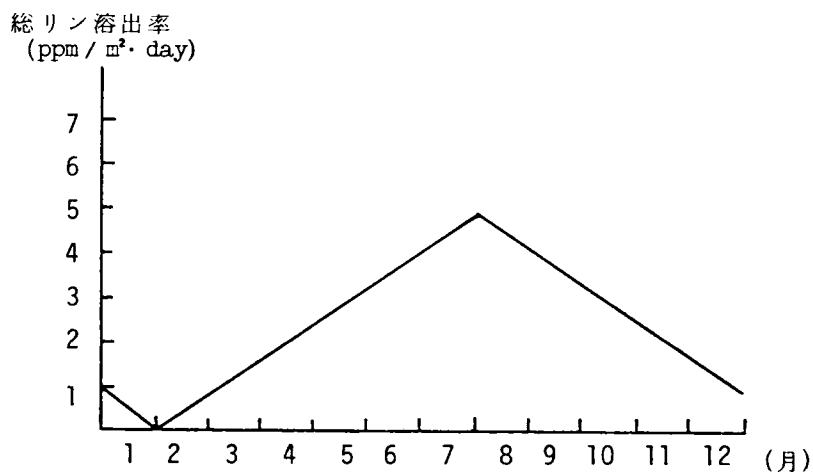
図一五—五 有機態窒素の流入負荷量と  
流入流量との関係



図一五—六 総リンの流入負荷量と流入流量との関係



図－５－７ 無機態窒素の溶出率



図－５－８ 総リンの溶出率

### 3) $\Delta x$ 及び $\Delta z$ の値

富栄養化に関係する各種水質濃度の分布は、1.5.で図－1－31, 32 の例で示したように、濁度と同様、水深方向ばかりでなく流れ方向にも変化する。ところが、貯水池の幾何形状や流れの運動学的特徴及び水温分布特性、さらには生物学的生産・消費の時間的・空間的スケールに関連した各種水質濃度分布の空間的一様性やスケールは、その基礎となる実測資料が乏しいこともあって、未だ十分には明らかでない。このため、 $\Delta x$  及び  $\Delta z$  の値をどの程度にとれば水理解析上妥当であるかを、ここで論ずることは困難であるが、図－1－31 に示したクロロフィル a の分布傾向や、淡水赤潮などプランクトンの異常発生が局所的かつ短時間のうちに生起することがしばしば観測されている事実を考えると、少なくとも 4.3.3. で検討した濁度分布に対するものと同程度

か、あるいはそれ以下の値を用いる必要があろう。この意味からすれば、表－5－2に示した $\Delta x$ 及び $\Delta z$ の値は、水理学上妥当なものとはいえないが、実際には解析に用いる入力資料の計測スケールならびに計算条件の推定精度との整合性を考えると、濁度解析の場合と同様、実用上は余り問題ないであろう。

もちろん、富栄養化現象をより正しく解析するためには、現象の空間的スケールに基きより小さな $\Delta x$ 、 $\Delta z$ の値を用いなければならないことはいうまでもなく、そのための各種資料の収集・整備を今後ともより一層進めなければならない。

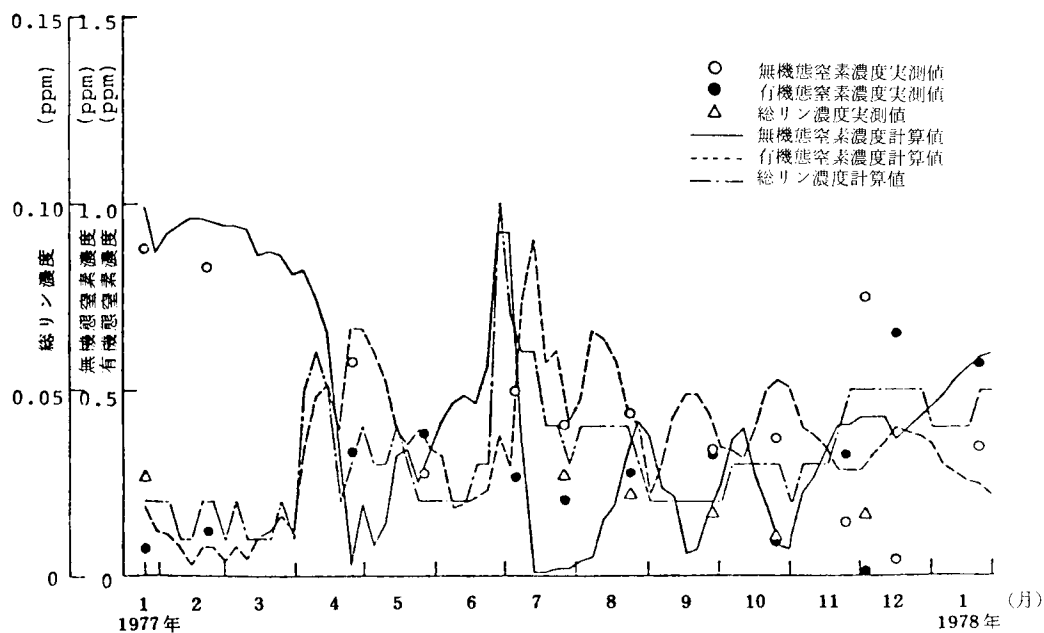
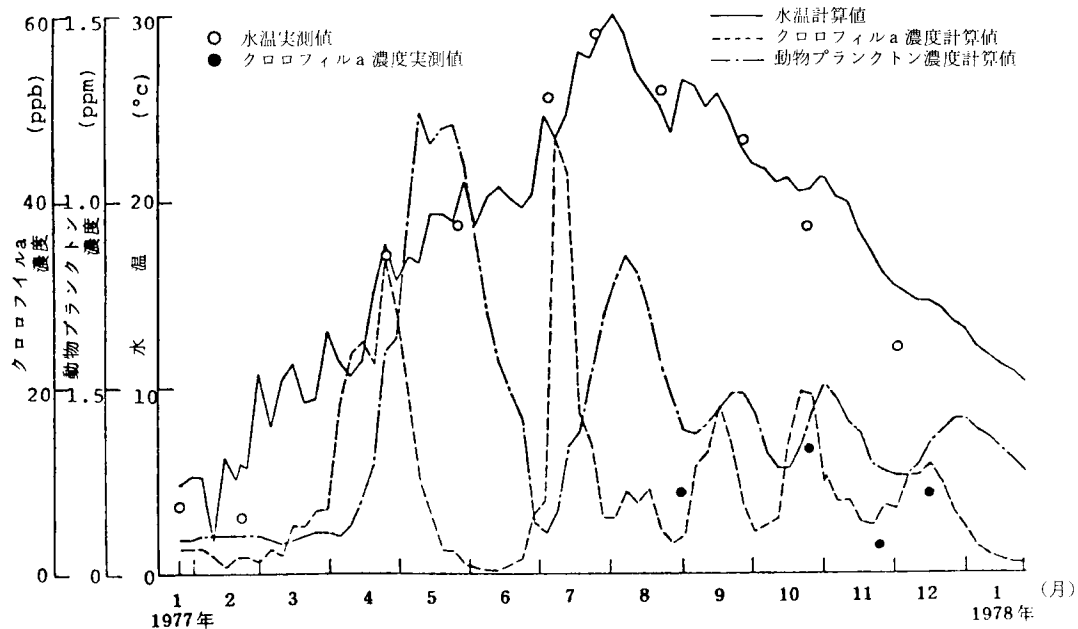
### 5.3. 室生貯水池における予測例とその考察<sup>1), 2)</sup>

#### 5.3.1. 現象再現結果

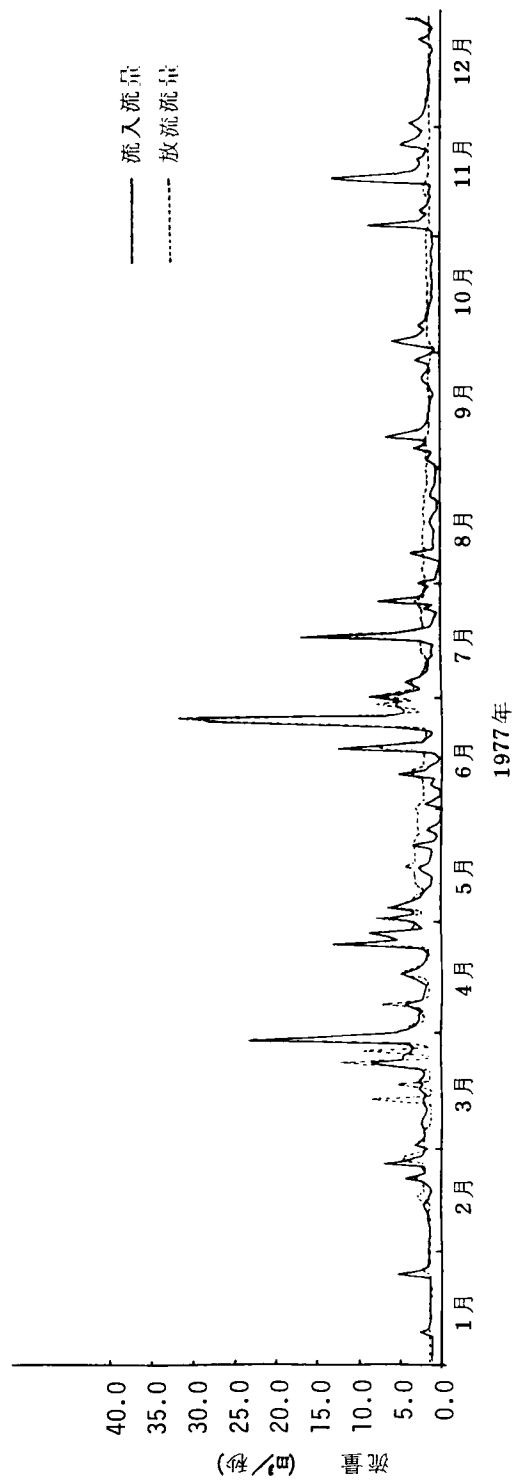
5.2.に述べた各種計算条件のもとで、室生貯水池における各種水質濃度変化を、昭和52年1月25日～昭和53年1月31日の期間を対象に数値解析した結果について考察する。

まず、得られた水温及び各種水質濃度の時間的変化の一例として、貯水池最下流地点カラムでの最上層ブロックにおける計算値と実測値とを比較して示したものが図－5－9である。この図をみると、実測値の数が少ないために、それぞれの詳細な変化については明らかでないが、計算値はいずれも実測値の示す年間変化の傾向を概ね再現していると考えてよいであろう。各計算値の変化をみていくと、クロロフィルa濃度（植物プランクトン濃度）は、水温が10℃以上となる4月初旬より上昇を始めその月の終わりに最初のピークが現われた後、7月中旬に再び高濃度のピークを示し、その後は、比較的小さな増減を繰り返しながら初期値と同程度の値にまで減少している。また、各ピークの前（約20～30日程度）には無機態窒素及び総リン濃度のピークがみられることがわかる。一方、有機態窒素濃度はクロロフィルa濃度の増減に対応してほぼ同様の变化傾向を示し、動物プランクトン濃度はクロロフィルa濃度に10日～30日程度の時間遅れをもって追従する形となっている。こうした各種水質濃度の変化傾向は、生物学的生産・消費過程における食物連鎖の関係を表わすものであるが、この変化のスケールについては、現実のものがよくわかっていない今日、その実際を評価することはできない。

ところで、クロロフィルaのピーク前に出現する窒素、リン濃度のそれは、図－5－10に示す貯水池流入流量の変化よりわかるように、出水時における流量増加に対応した流入栄養塩負荷量の増大に伴うものである。すなわち、こうした栄養塩濃度の増大と、6月下旬の例に顕著にみられる動物プランクトンの貯水池外への流出による濃度低下が、その後のクロロフィルa濃度の計算値に大きな影響を及ぼしているわけであるが、このような現象が実際にもみられるかどうかは、実測資料のない今日では明らかでない。しかし、流域内で発生し貯水池へ流入する栄養塩量には限界があり、また動物プランクトンが自泳力を有することを考えると、計算値に示されたような各濃度変化にはいくらか疑問が残る。この点は今後の研究課題であるが、貯水池が自然湖



図—5—9 水温及び各種水質濃度の時間的変化に関する計算結果



図—5—10 室生貯水池における流入流量及び放流流量 (1977年)

沼に比べ流入・流出流量の変化の影響を受け易い性格を有していることを考えれば、出水時における流入・流出量の特性とその富栄養化に及ぼす影響を明らかにすることは重要であろう。

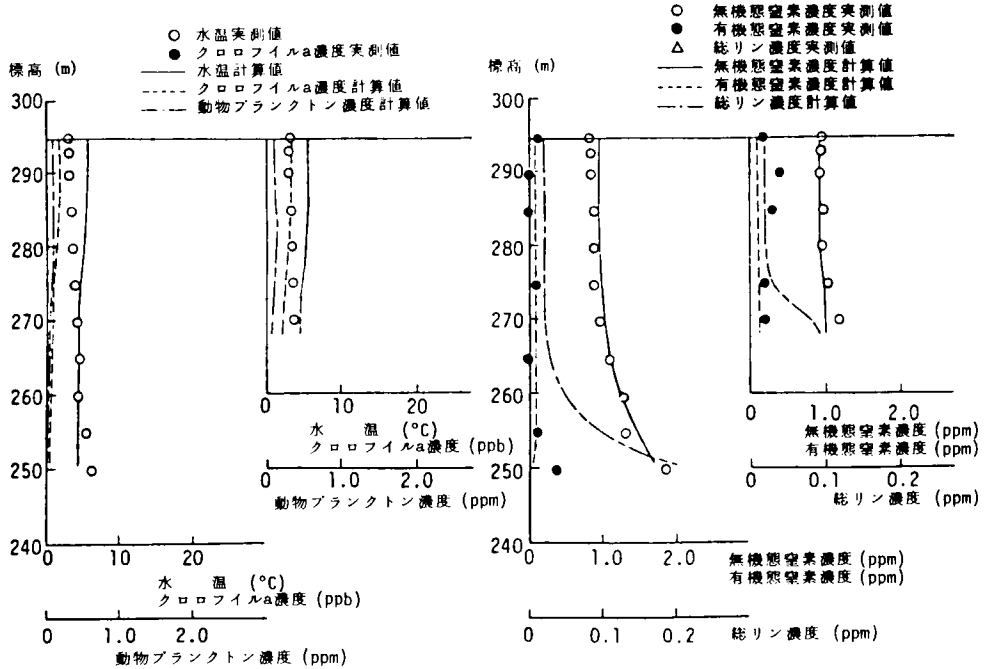
つぎに、水温及び各種水質濃度分布の計算結果を実測値と比較した例を、図-5-11(a)~(d)に示す。これらの図は、各季節毎に比較的水質資料が整った日について比較したものであり、その結果をまとめると次のようである。

計算値と実測値の一致の程度をみると、生物学的過程に関係しない水温ならびに総リン（図-5-11(a), (b)では欠測）は比較的良好である。一方、冬季（図-5-11(a)の例）を除いて、生物学的変化による影響が支配的となるクロロフィルa、無機態及び有機態窒素濃度については、分布形状の定性的傾向は概ね一致していると考えられるが、値自体には問題が残されているところが少なくない。しかし、オーダー的にはほぼ満足される値が得られており、実測値の分析精度ならびに流入水質に関する境界条件の推定精度等を考えれば、それほど現実と異なった結果であるともいえないであろう。

ついで、各種水質濃度分布について得られた結果の特徴を述べると、クロロフィルa濃度は水温成層の形成期間においては、表水層で高濃度となり変温層とはほぼ同位置に濃度急変層を形成し、水表面と水深10m程度との間で最大濃度を示す傾向がある。この傾向は、計算期間内の透明度の資料（約1m~5m）より推定される生産層の深さ、約2.5m~12.5m（天然湖沼においては透明度の約2.5倍が生産層の深さに相当するといわれている。しかし、貯水池においてはこの関係は十分に明らかでない。）にほぼ対応すると考えることもできるが、その実際についてはよくわからない。いずれにせよ、クロロフィルaの生産に関係する日射、水温及び栄養塩濃度の分布と、後2者に関係する流れの運動学的特徴を反映した結果であるといえよう。動物プランクトン濃度は、クロロフィルa濃度にはほぼ対応した分布傾向を示しているが、52年8月23日の例では、変化が逆になるところもみられ、先に述べた両者の時間的変化の遅れが示されている。一方、無機態窒素濃度はクロロフィルa濃度と全く逆の分布形状となり、食物連鎖過程における生物学的消費の影響が顕著に現われている。また、深水層では、溶出項が支配的となり、これによって高濃度を示す点が特徴的である。有機態窒素濃度はクロロフィルa濃度と動物プランクトン濃度の分布を重ね合わせたような分布形となり、両者に起因するものが支配的であることを示している。総リン濃度は溶出項により深水層で高濃度を示す傾向があることを除けば、濁度の平常時における分布と同様であり、移流及び沈降に支配される形となる。なお、冬季（昭和52年2月22日の例）においては、いずれの水質濃度もほぼ一様であり、生物学的生産・消費による水質変化は顕著にあらわれていないことがわかる。

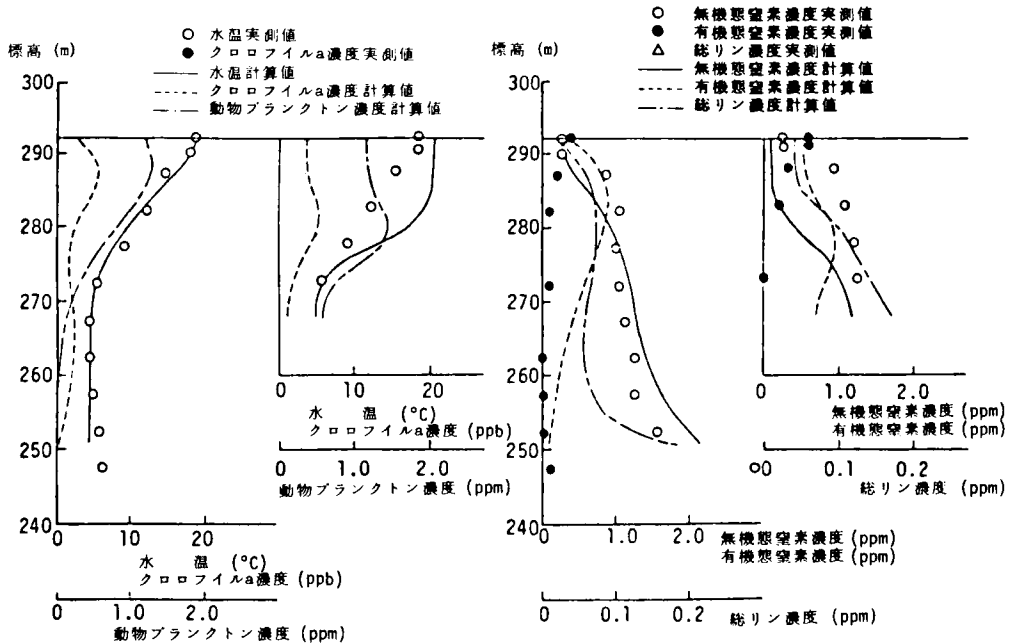
以上が生貯水池における富栄養化解析の結果であるが、図-5-11では、クロロフィルa及び動物プランクトン濃度についての、計算値と実測値との比較が不十分であったので、これを補足するため他の計算例を示すと図-5-12のようである。この図より、各濃度の計算値の再現性は、先に述べたと同様であることがわかる。また、昭和52年8月31日及び9月30日のクロロ

1977年2月22日



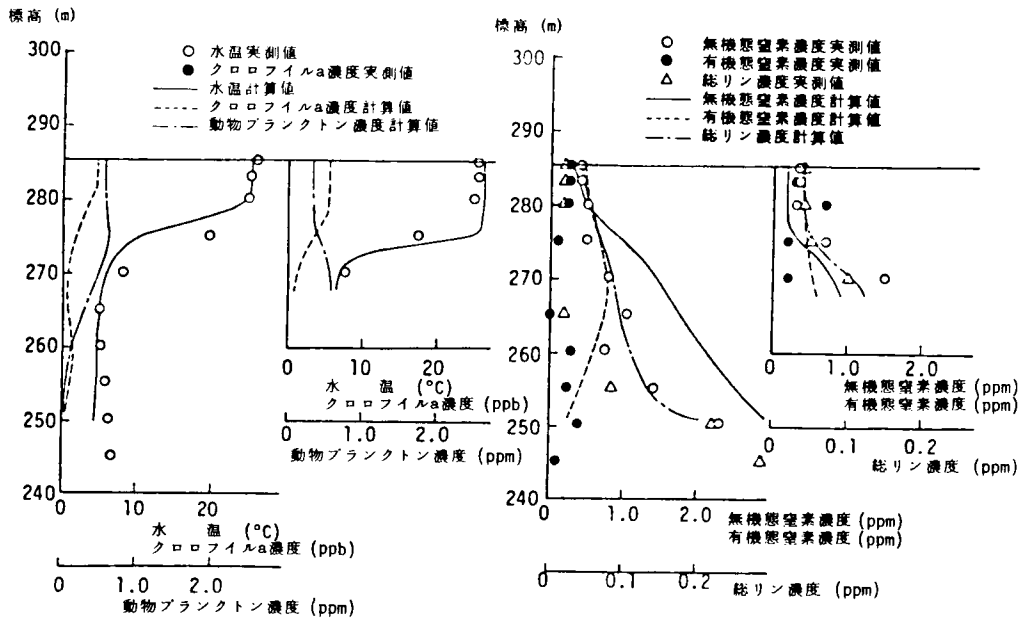
図—5—11(a) 水温及び各種水質濃度分布の再現例 (室生貯水池, 1977年2月22日)

1977年5月24日



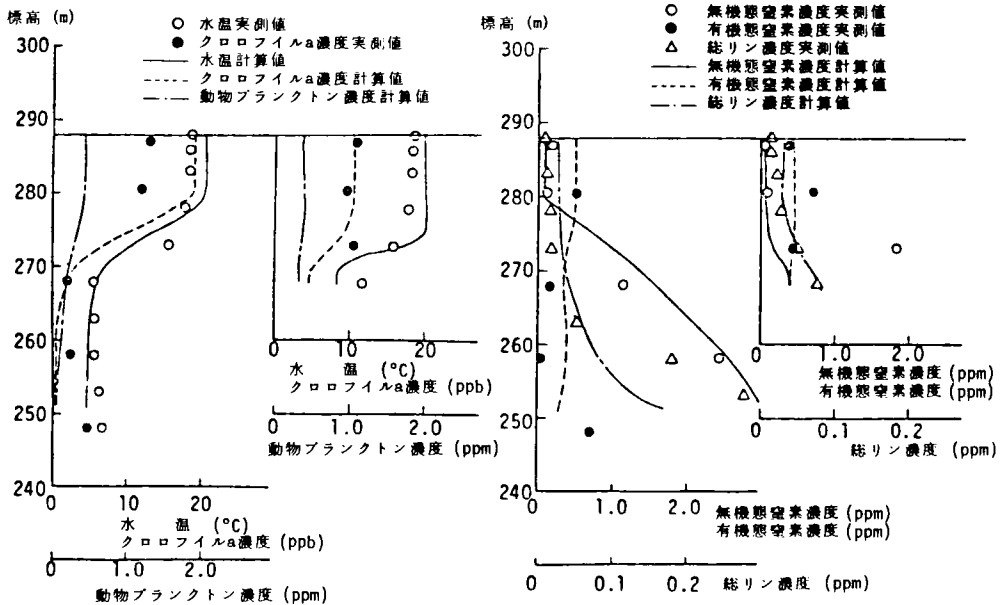
図—5—11(b) 水温及び各種水質濃度分布の再現例 (室生貯水池, 1977年5月24日)

1977年8月23日



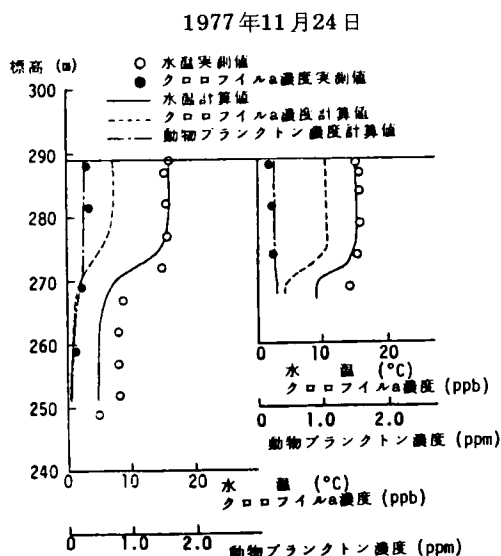
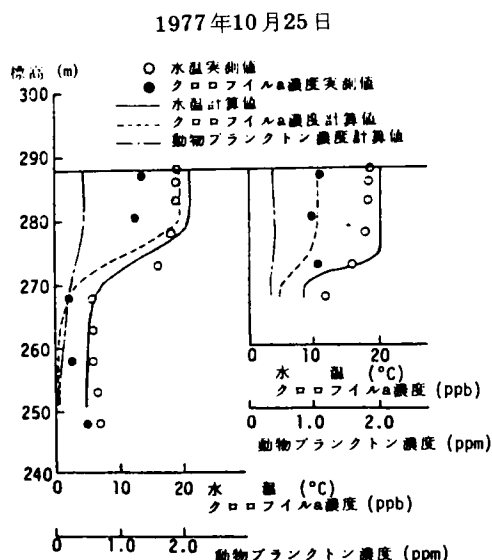
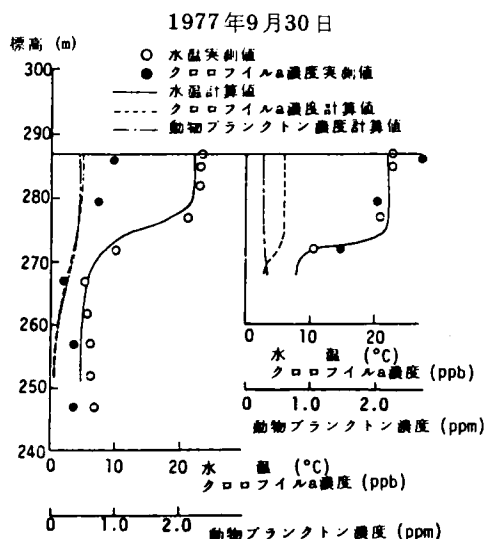
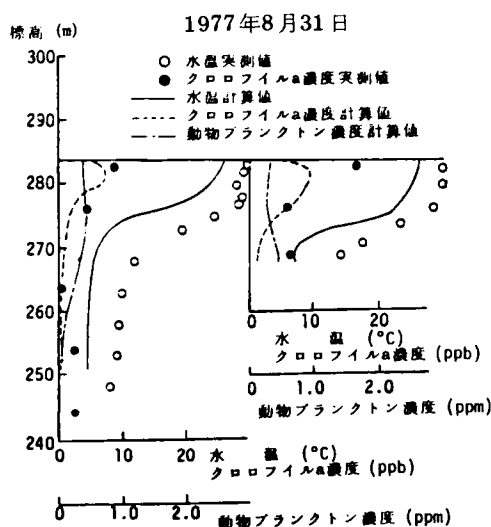
図一5—11(c) 水温及び各種水質濃度分布の再現例 (室生貯水池, 1977年8月23日)

1977年10月25日



図一5—11(d) 水温及び各種水質濃度分布の再現例 (室生貯水池, 1977年10月25日)





図一五—12(a) 室生貯水池におけるクロロフィル a 及び動物プランクトン濃度分布の計算結果

フィル a 濃度実測値には、貯水池最下流部と取水口地点でかなりの濃度差がみられるが、こうした流れ方向の変化の再現については必ずしも良好であるとはいえない。とくに、9月30日の計算値ではこの傾向が表現されていない。これは、計算に用いた  $\Delta x$  の値がやや過大であったことによるものと思われ、流れ方向の変化をより忠実に再現するには、5.2.でも述べたように、さらに小さな  $\Delta x$  の値を用いる必要がある。

いずれにせよ、第2章に述べた貯水池水理モデルを室生貯水池における富栄養化解析に適用し

1977年12月16日

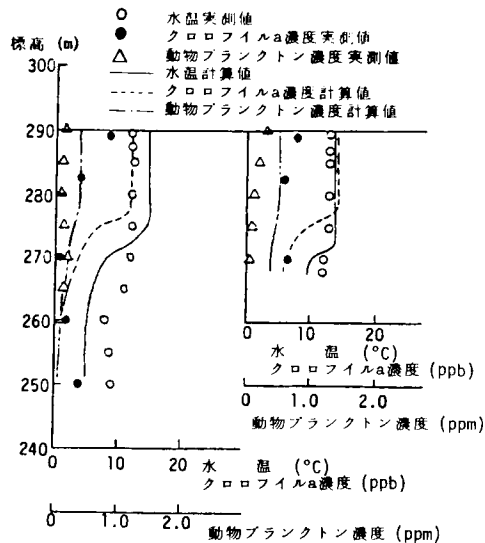


図-5-12(b) 室生貯水池におけるクロロフィル a 及び動物プランクトン濃度分布の計算結果

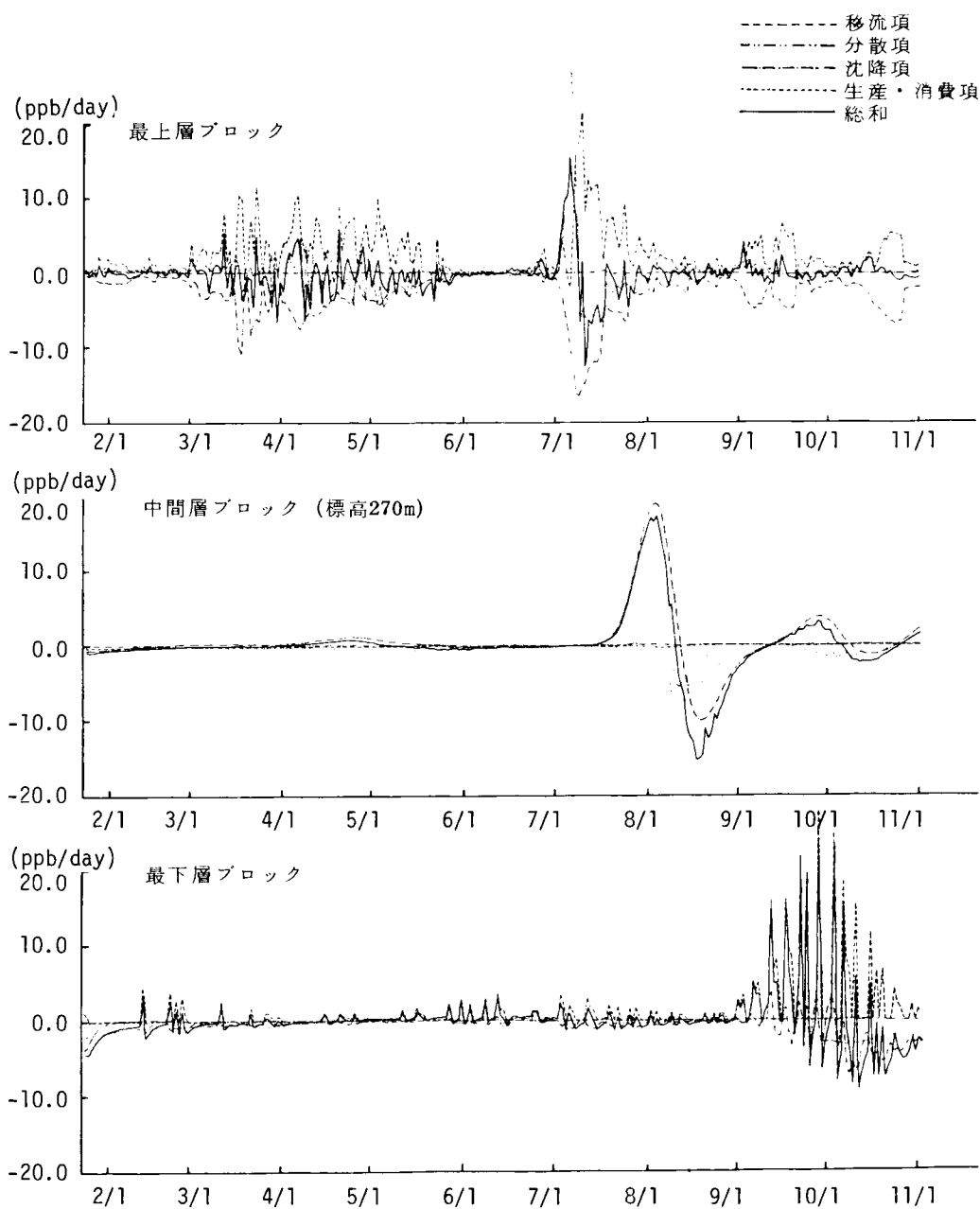
た結果、得られた計算値は、富栄養化に関する各種水質濃度の時間的・空間的変化を少なくとも定性的には十分に再現しうることがわかった。これは、従来モデルでは不十分であった貯留水の流れの運動学的挙動及び水温分布を同時に明らかにした結果であるといっても過言ではなく、用いたモデルならびに数値解析法の妥当性、有効性が示されたといえよう。しかしながら、流れ方向に関する水質変化の再現や、また各種水質濃度の値自体についての計算精度には不十分なところもあり、現象をより忠実に明らかにするためには、モデルとくに生物学的生産・消費に関する部分の改良と、貯水池をより細かく分割した詳細な解析の実施が必要であろう。

### 5.3.2. 各種水質濃度変化の主要因に関する考察<sup>3)</sup>

これまでに述べた室生貯水池における富栄養化現象の再現結果がいずれの水質変化機構に支配されたものであるか、すなわち、(2-30)～(2-34)式の濃度収支式における移流、分散、沈降及び生産・消費項のうち、いずれが卓越するかを調べ、貯水池における富栄養化機構とその取扱いについて検討しよう。

まず、富栄養化に関する水質要素のうち最も重要な水質指標であるクロロフィル a 濃度の変化を例にして、それに寄与する上述の各項の値が時間的・空間的にどのような関係にあったかを、1日当りの濃度変化率で示すと、図-5-13(a), (b)のようである。この図より、各項の値を比較してみると、次のように述べられよう。

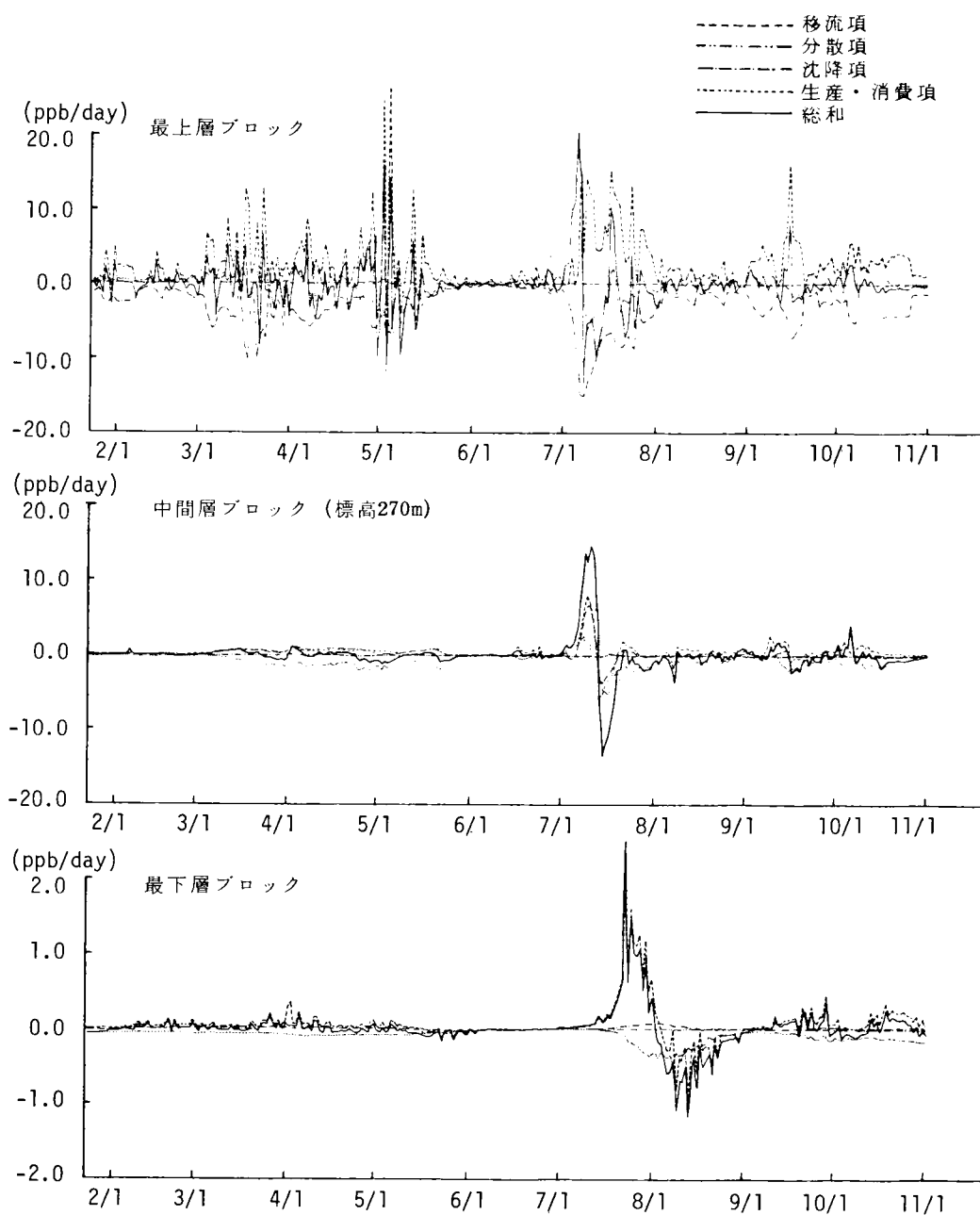
1) 分散項は、いずれのブロックにおいても他の項に比べて数オーダー小さく、これによる変化



図－5－13(a) クロロフィル a 濃度収支式における各項の値とその比較（室生貯水池最下流地点）

はほぼ無視しうると考えてよい。

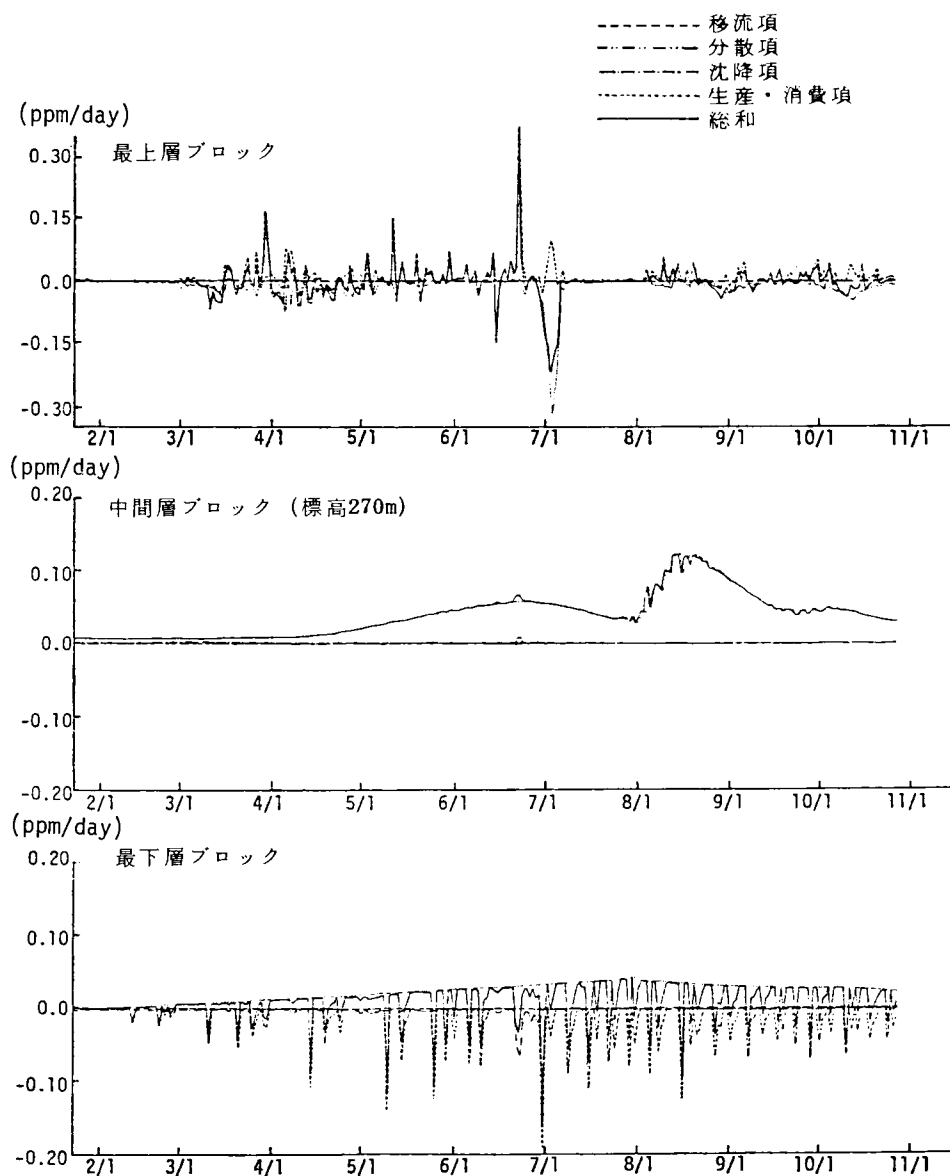
2) 貯水池表層ブロックにおいては、移流、沈降及び生産・消費項のオーダーはほぼ等しいが、移流項と沈降項は互いに相殺され、総和としての濃度変化率は、生産・消費項に支配される傾向がある。いいかえれば、表層ブロックでは、生産・消費項が一次的に重要であり、移流・沈



図ー5ー13(b) クロロフィル a 濃度収支式における各項の値とその比較  
(室生貯水池中間(取水塔)地点)

降はそれに起因する水質変動を流れ方向及び水深方向に伝播する二次的な役割をもつものと考えられる。

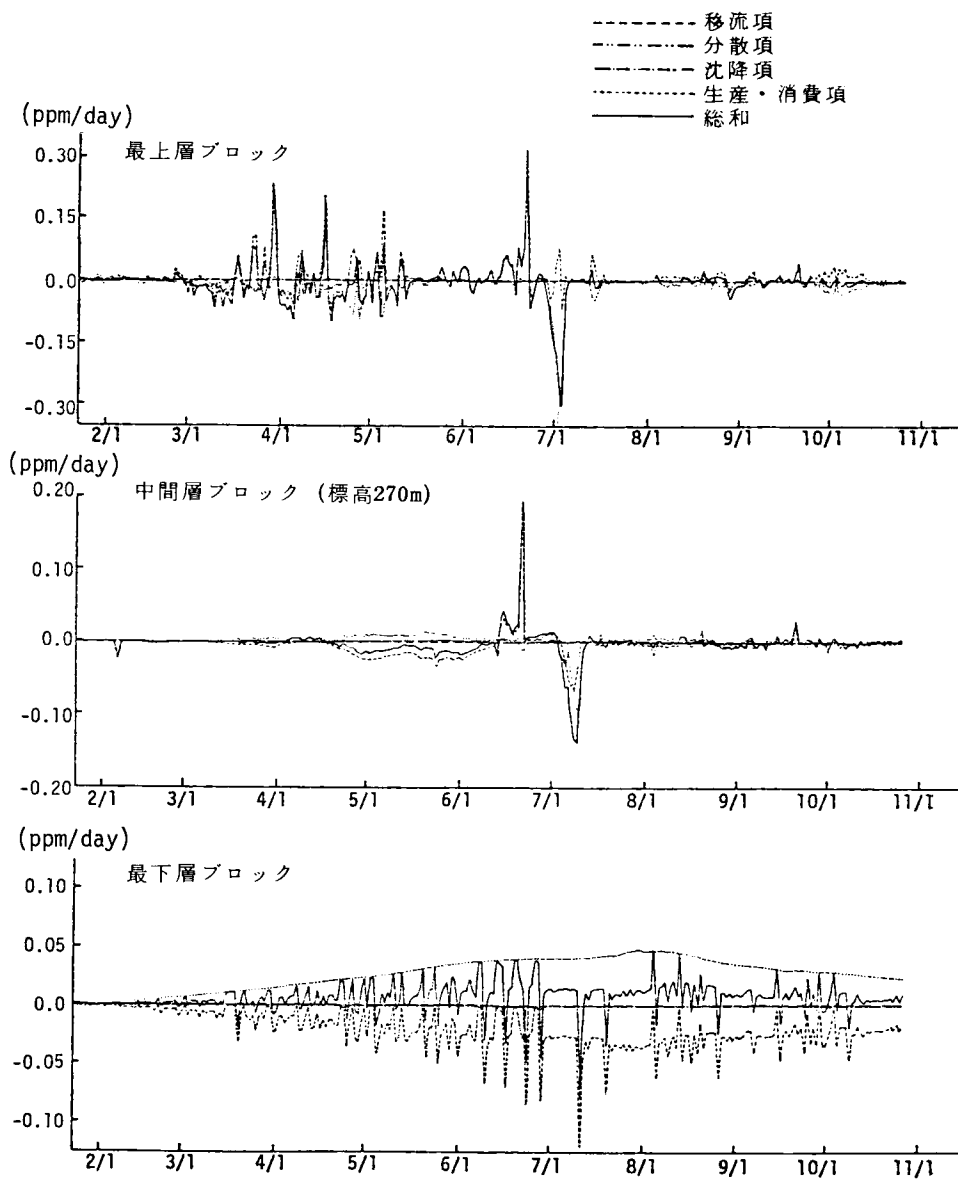
3) 取水口地点の中間層ブロックでは取水に伴う流れの影響を受けるため、表層における場合と



図一五—14(a) 無機態窒素濃度収支式における各項の値とその比較 (室生貯水池最下流地点)

同様に移流項、沈降項及び生産・消費項の値がほぼ同程度で、その総和は表層のそれに比べ同程度か1オーダー低い程度である。一方、貯水池最下流地点の中間層ブロックでは、流速が極めて小さいために、移流による変化はほとんどなくなり、沈降項と生産・消費項が卓越する。このうち、総和としての変化率を支配する傾向があるのは前者であり、後者による変化は二次的なものに過ぎない。また、その変化率は表層に比べ1～2オーダー低い値となっている。

4) 貯水池底に接する最下層ブロックにおける各項の関係は、3)に述べたものとほぼ同様である



図－５－１４(b) 無機態窒素濃度収支式における各項の値とその比較  
(室生貯水池中間(取水塔)地点)

が、その値は中間層ブロックのものに比べさらに１オーダー程度低い。

以上はクロロフィルa濃度の変化に関するものであるが、他の水質濃度、例えば栄養塩としての無機態窒素について調べてみると、図－５－１４(a), (b)のようである。これらの図より、無機態窒素濃度に関しては、表層ブロック及び取水口地点の中間層ブロックのように移流効果が大きいところで、流入(出)水に伴う移流負荷量による変化が卓越し、出水時(６月下旬)にはそれ

が特に顕著であることがわかる。生産・消費項はオーダー的には移流項と同程度で、そのほとんどが植物プランクトンの摂取に伴う消費（負の値）であるが、それが卓越するのは短期間に過ぎない。このことは、5.2.1.に述べた解析例では、流出入に関する境界条件が結果に大きな影響を及ぼしたことを示している。一方、貯水池最下流地点の中間層及び最下層の各ブロックでは生産・消費項が支配的であり、移流による影響は分散項と同様に極めて小さい。

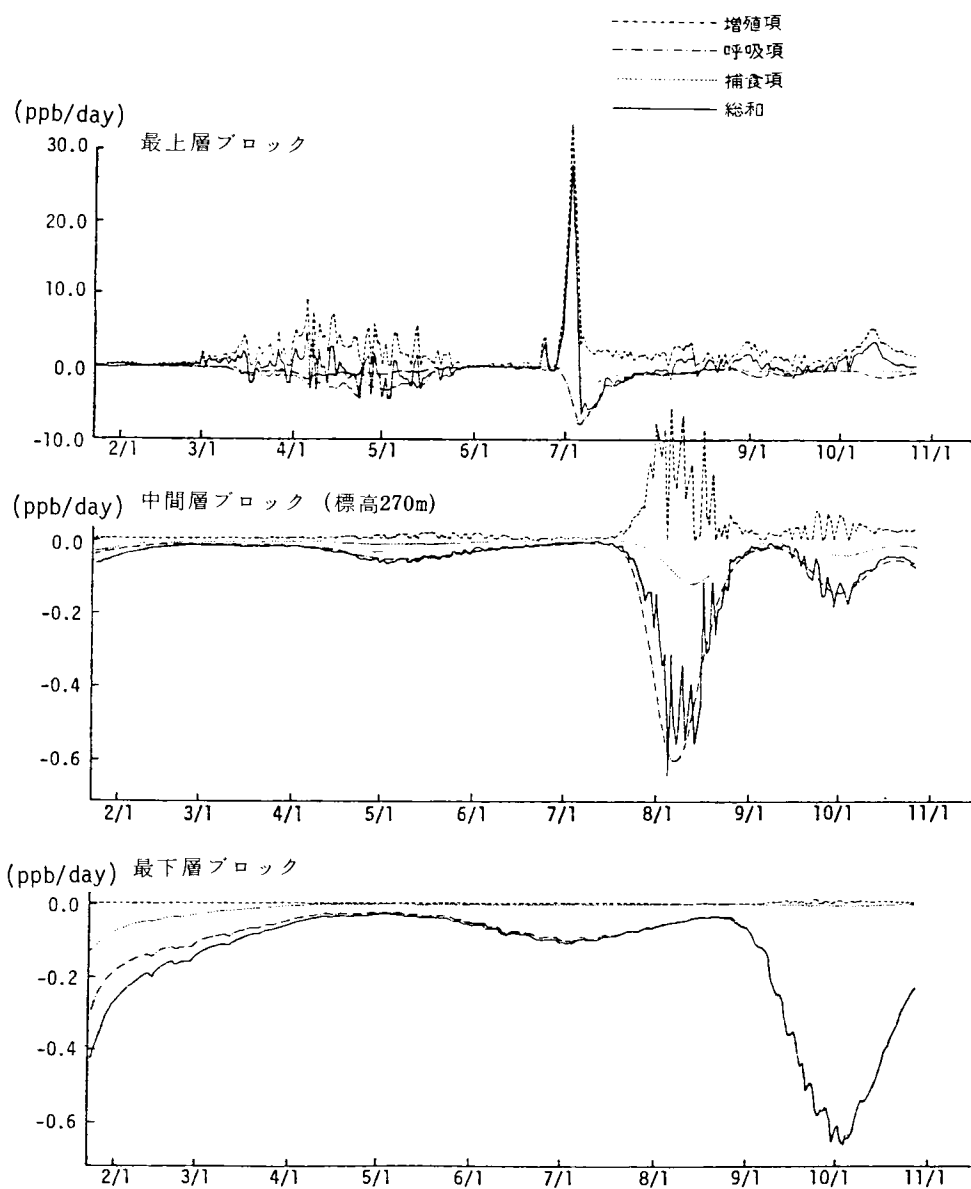
つぎに、表水層でのクロロフィル a 濃度の変化に重要な役割を果す生産・消費項について、その構成要素である増殖、呼吸、捕食の各項の関係を調べてみると、図-5-15 のようである。この図より、表層ブロックでは、増殖項の変化に呼吸項、捕食項が順次数日程度の遅れをもって追隨すること、また、それらの変化は増殖項に比べると緩やかで、どちらかといえば呼吸項の方がより大きな値を示していることがわかる。一方、増殖項の変化には、比較的長時間スケールの長い季節的なものと洪水の流入等の影響による一時的なものに加え、日射の日変化を反映した短いスケールの変動が認められる。中間層ブロックでは、表層に比べ各項の値が1～2 オーダー低くなり、呼吸項が卓越してくる。また、最下層ブロックではさらにその傾向が顕著となり、増殖項はほぼ0に近い値である。

同様に、無機態窒素濃度に関する生産・消費項について調べてみると、図-5-16 に示すようである。これから、表層ブロックでは植物プランクトンの摂取に伴う消費項、中間層では有機態窒素の無機化による生産項が卓越することがわかる。なお、最下層では図-5-14 に示されたような底泥からの溶出による生産項が卓越している。

以上の結果より、富栄養化に関する各種水質濃度の生産・消費項のなかで、もっとも重要なものはクロロフィル a 濃度の生産項、すなわち植物プランクトンの増殖項であり、その値とその変化が、他の水質濃度の生産・消費にも大きな影響を及ぼすことが推測される。したがって、現象をできるだけ精度良く再現するには、この増殖項とそれに関する諸要素、例えば大きな影響を及ぼす水温及び日射との関係などをより明らかにし、できるだけ忠実なモデルとして表現することが必要であろう。

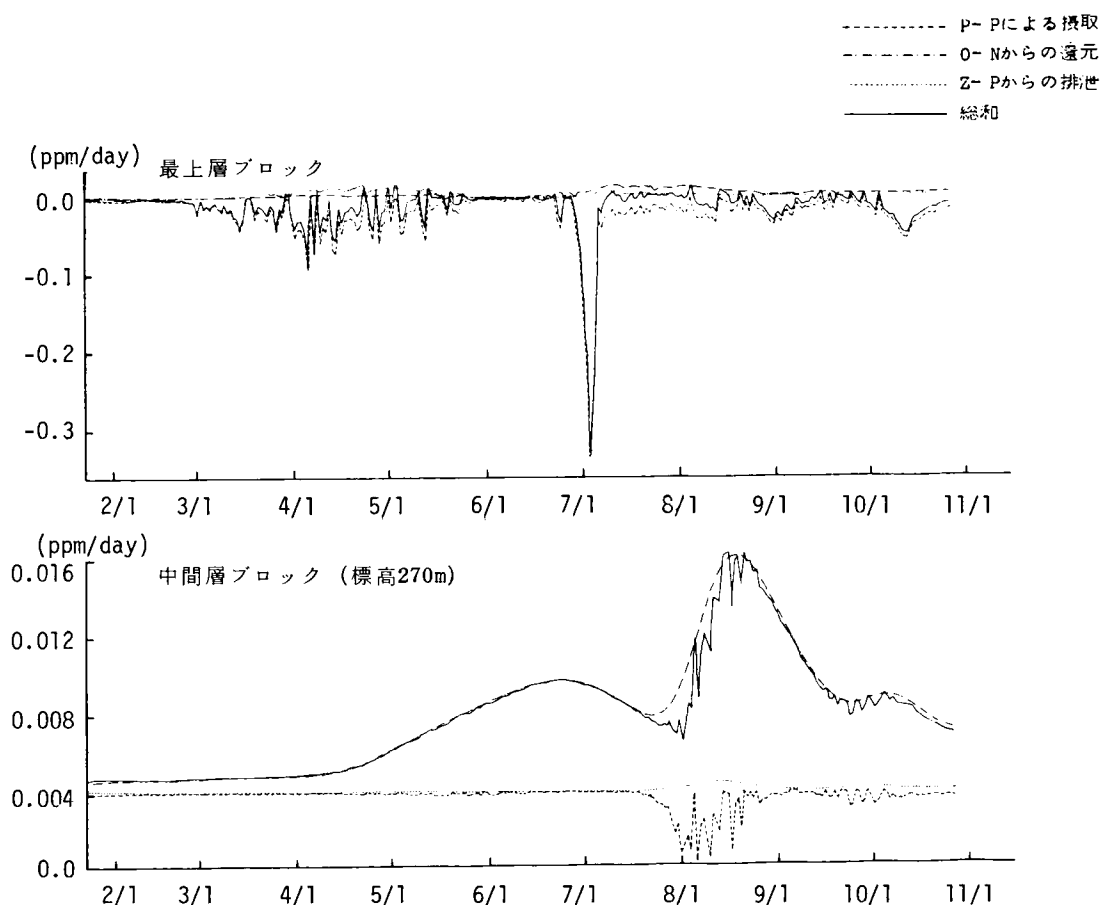
また、図-5-13～16 に示した解析結果を総合すると、流入に関する境界条件が水質変化に及ぼす影響は、表水層及び貯水池上流部など、移流効果が大きいところに現われることが予想される。一方、底泥から溶出する栄養塩は、水温成層が発達した期間においては、表水層へ移流あるいは拡散されることはほとんどなく、表水層での生物生産に関係するのは、流入に伴う移流栄養塩量であると考えられる。

以上に述べたことは、あくまでも5.3.1.に示した室生貯水池での計算例に基くものに過ぎないが、成層型貯水池における富栄養化機構とその取扱いについて、いくつかの有益な示唆を含んでいるといえよう。



図—5—15 クロロフィル a 濃度の生産・消費に関する各項の値とその比較  
(室生貯水池最下流地点)





図－5－16 無機態窒素濃度の生産・消費に関する各項の値とその変化  
(室生貯水池最下流地点)

#### 5.4. 生物学的生産・消費に関するモデルの改良とその適用結果<sup>3), 4)</sup>

これまでに述べた結果とその考察から、2.5.及び2.6.で説明した貯水池水理モデルの富栄養化解析への応用によって、富栄養化に関係する各種水質濃度の時間的・空間的変化が少なくとも定性的には正しく再現されうることが実証された。しかしながら、実際現象をより忠実に再現するには、生物学的生産・消費に関するモデルをさらに改良するとともに、貯水池をさらに細分割した詳細な解析が必要であることもわかった。

そこで、以下では、こうした考察結果に基づいて生物学的生産・消費に関するモデルの改良を試み、それを用いたより詳細な解析を実施してその結果を検討する。

生物学的生産・消費に関するモデルの改良にあたっては、次のように考える。

1) 生物学的生産・消費に対する水温の影響を一次比例形で表現した結果では、低温期及び低温

域での生物活動を過少評価する傾向がみられたため、この点を考慮してそれを指数関数形で表わす。

2) 植物プランクトン個体密度の増大に伴う増殖率への影響、すなわち津野ら<sup>7)</sup>が指摘するようなスペース効果を考慮する。

3) 図-5-17に示すような、クロロフィル a 濃度と透明度との関係から、浮遊粒子による光の消散効果をクロロフィル a 濃度の関数として導入する。

4) 動物プランクトンの高次生物による捕食は他の項に比べて小さく無視しうるものとする。

このようにして、(2-30)～(2-34)式の生産・消費項を改めると、得られる各水質濃度収支則は、次のようになる。

• クロロフィル a 濃度；

$$\frac{\partial C_P}{\partial t} = F(C_P) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} [C_P w_{0C_P} A | \frac{z_{n+1}}{z_n} + G_{C_P} - R_{C_P} \theta_{C_P}^{(T-20)} C_P - G_Z] \quad (5-2)$$

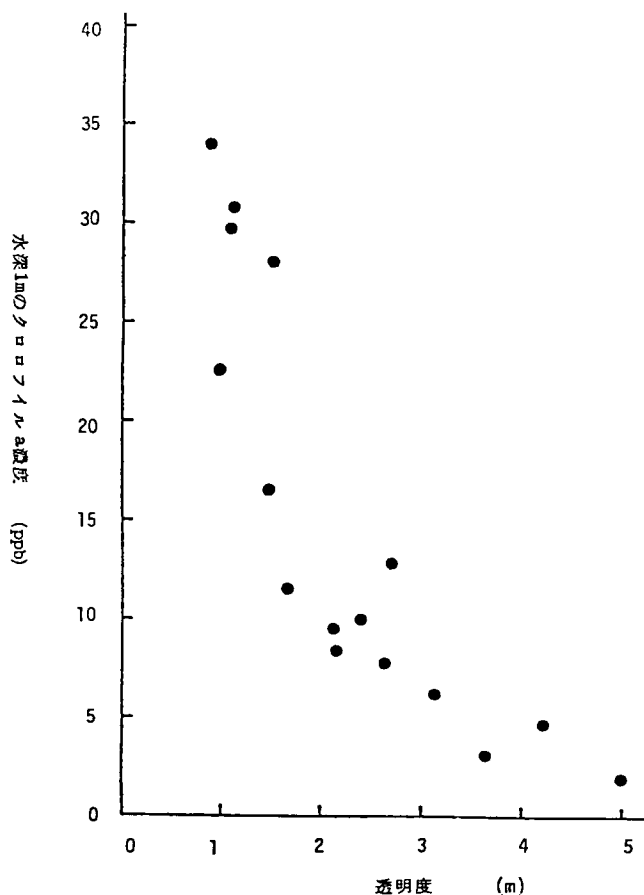


図-5-17 クロロフィル a 濃度と透明度との関係

- 動物プランクトン濃度（炭素濃度）；

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = F(Z) + \alpha a_z G_z - R_z \theta_z^{(T-20)} Z \quad (5-3)$$

- 無機態窒素濃度；

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_I}{\partial t} = & F(N_I) - \beta G_{C_P} + R_N \theta_N^{(T-20)} (N_0 - \beta C_P - r Z) \\ & + \beta (1 - a_z) G_z + \frac{E_{N_I}}{1000 \cdot \Delta z} \end{aligned} \quad (5-4)$$

- 有機態窒素濃度；

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_0}{\partial t} = & F(N_0) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} | N_0 \cdot w_{0N_0} \cdot A |_{z_n^{n+1}} + \beta C_P - R_N \theta_N^{(T-20)} (N_0 - \beta C_P - r Z) \\ & - \beta (1 - a_z) G_z \end{aligned} \quad (5-5)$$

- 総リン濃度；

$$\frac{\partial P_h}{\partial t} = F(P_h) - \frac{1}{A \cdot \Delta z} | P_h \cdot w_{0P_h} \cdot A |_{z_n^{n+1}} + \frac{E_{P_h}}{1000 \cdot \Delta z} \quad (5-6)$$

ここに、

$$G(C_P) = S_P \cdot R_P \cdot \theta_P^{(T-20)} \frac{I_{z_n}}{I_s} \exp\left(1 - \frac{I_{z_n}}{I_s}\right) \cdot \frac{N_I}{K_{N_I} + N_I} \cdot \frac{P_h}{K_{P_h} + P_h} \cdot C_P \quad (5-7)$$

$$G_z = C_g \cdot \frac{K_{C_P}}{K_{C_P} + C_P} \cdot C_P \cdot Z \quad (5-8)$$

$$\text{また, } S_P = \exp(-\mu_s C_P) \quad (5-9)$$

$$I_{z_n} = I_0 \exp\{-\eta(z_s - z_n)\} \quad (5-10)$$

$$\eta = \eta_0 + \mu_\eta C_P \quad (5-11)$$

である。

新しく用いた記号は、 $R_P$ ,  $R_{C_P}$ ,  $R_Z$ ,  $R_N$ ；それぞれ  $T = 20^\circ\text{C}$  におけるクロロフィル a 濃度生成率，同じく消滅率，動物プランクトン濃度消滅率，窒素変換率， $\theta_P$ ,  $\theta_{C_P}$ ,  $\theta_Z$ ,  $\theta_N$ ；上述の各変化率に対する温度係数， $S_P$ ；スペース効果係数， $\mu_s$ ,  $\mu_\eta$ ；定数である。

(5-2)～(5-6) 式の各濃度収支則を用いて，5.2.に述べた解析と同様に，室生貯水池における富栄養化の数値解析を実施する。数値解析法及び解析条件は次の点を除くと 5.2.で述べたものと同じである。

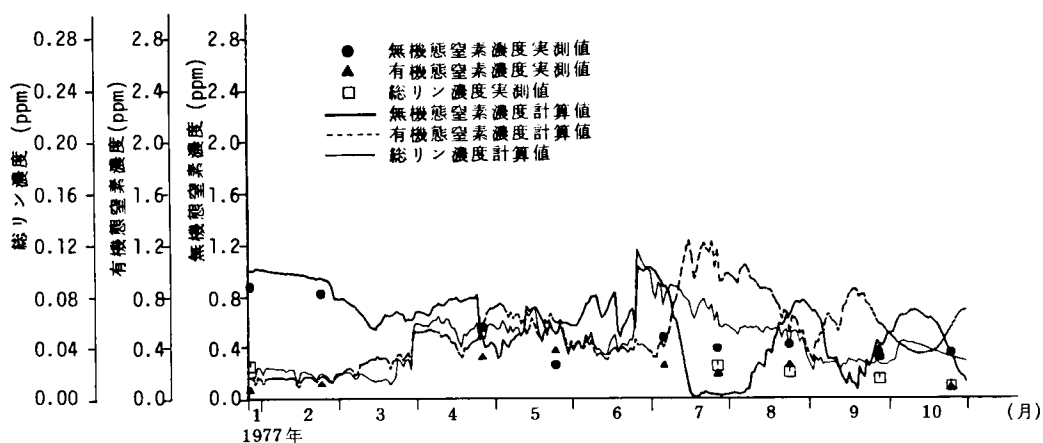
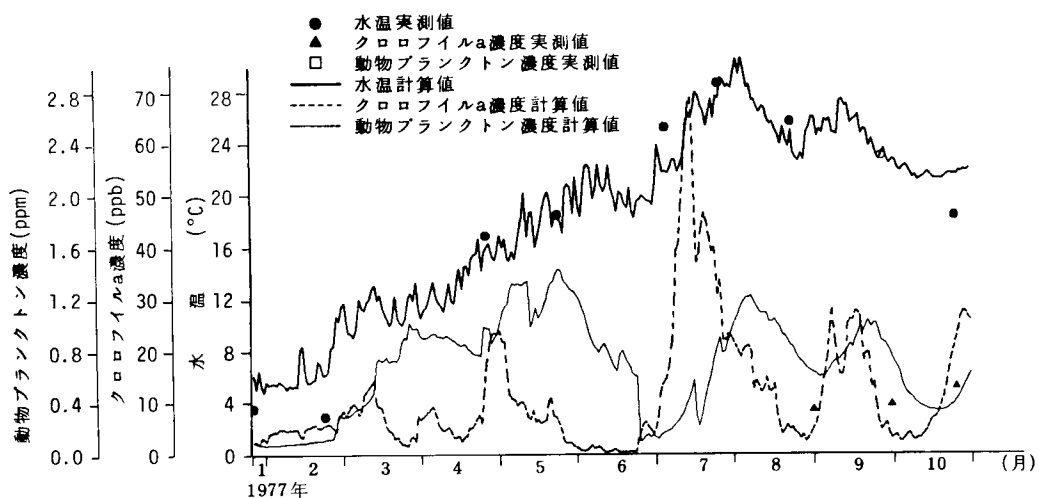
- 1) 解析に用いる  $\Delta x$  の値は，5.2.での貯水池分割に関する議論や，5.3.1.における解析結果の検討に基いて， $\Delta x = 200 \text{ m}$  とする。
- 2) 対象期間は，昭和52年1月25日～昭和52年10月31日までとする。

表－５－３ 富栄養化解析（改良モデルによる）  
に用いる各種係数値

記 号	係 数 値
$R_T$	0.919 (1/day)
$R_{CP}$	0.0957 (1/day)
$R_Z$	0.0383 (1/day)
$R_N$	0.027 (1/day)
$\theta_T$	1.05
$\theta_{CP}$	1.05
$\theta_Z$	1.05
$\theta_N$	1.05
$\alpha$	0.05 (ppm-C/ppb-chla)
$\beta$	0.01 (ppm-N/ppb-chla)
$\gamma$	0.2 (ppm-N/ppm-Z)
$K_{CP}$	60 (ppb)
$K_{NI}$	0.1 (ppm)
$k_{ph}$	0.01 (ppm)
$I_S$	460 (cal)
$C_g$	0.25 (1/ppm.°C.day)
$a_Z$	0.6
$v_{o,Cp}$	0.3 (m/day)
$v_{o,Ph}$	0.3 (m/day)
$v_{o,No}$	0.3 (m/day)
$\mu_S$	0.0385
$\eta_o$	0.2
$\mu_n$	0.001

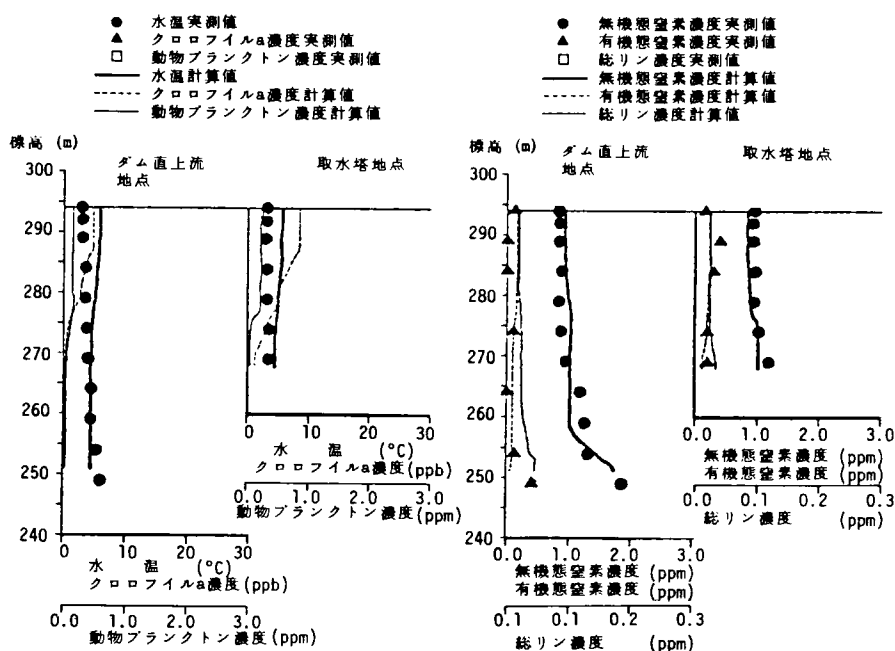
3) (5-2)～(5-16)式の生産・消費項に関する各種の係数値は表－５－３に示すように定める。

得られた結果は図－５－18～22に示すようである。まず、図－５－18の時間的变化に関する結果例をみると、計算値は、洪水後の6月末～7月の期間を除いて実測値といずれも概ね一致していることがわかる。5.2.1.で示した図－５－9の結果と比べると、春季におけるクロロフィルa濃度の変化に違いがみられるが、その他の点に関しては余り大差はなく、モデルの改良による効果ははっきりと認められない。また、図－５－19(a)～(d)に示した水温及び各濃度分布の再現

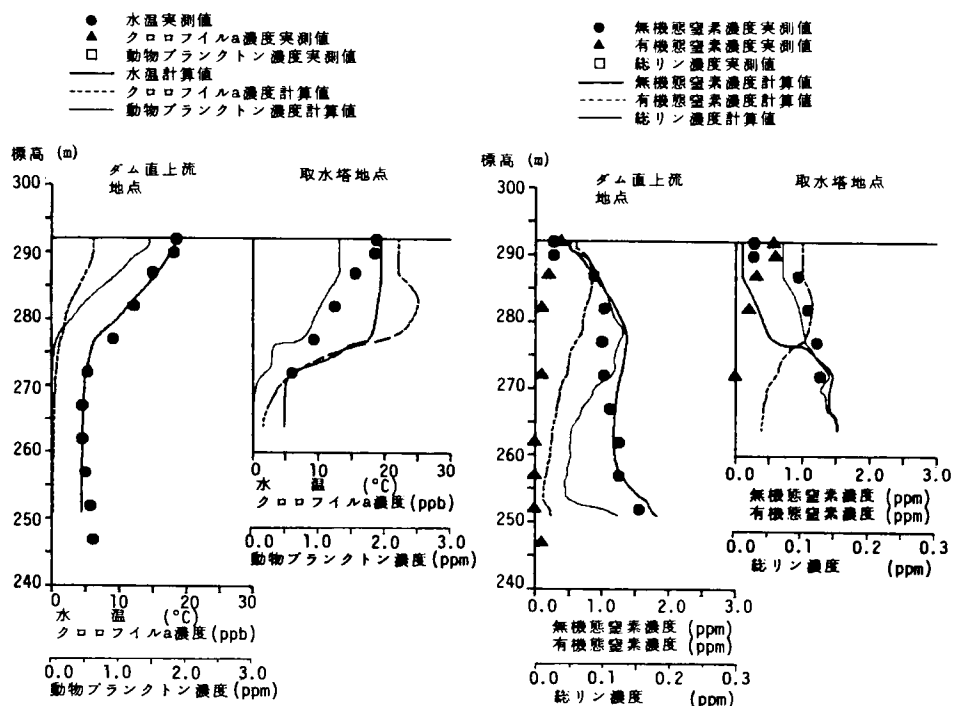


図－5－18 改良モデルによる水温及び各種水質濃度の時間的変化の再現結果（室生貯水池，1977年1月25日～10月31日）

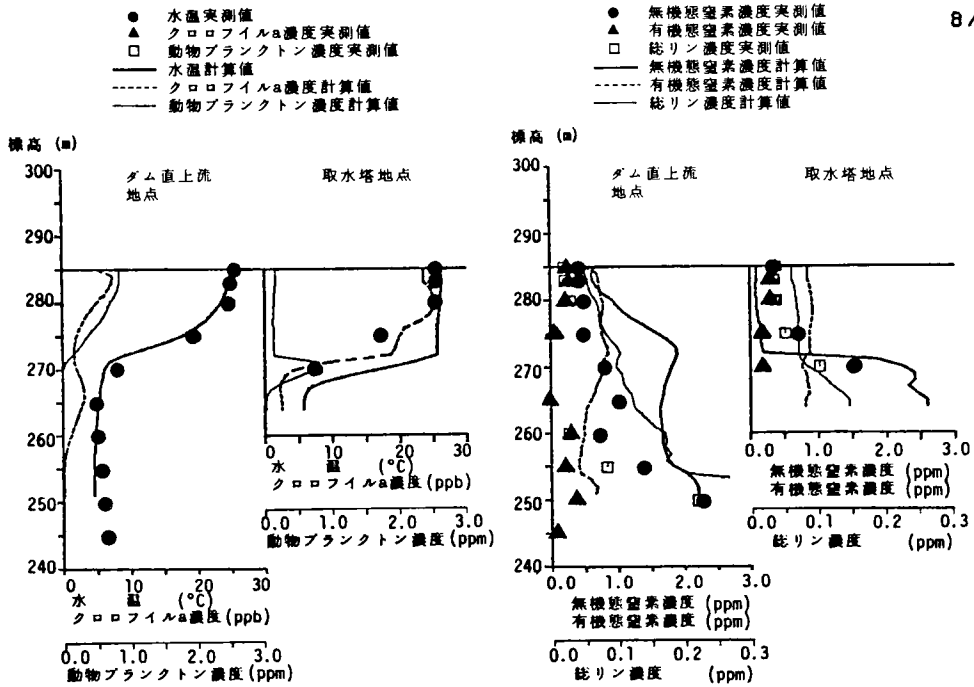
例でも，計算値は実測値の示す分布傾向を良好に再現しているが，図－5－11(a)～(d)の結果と比べ，計算精度の向上は余り顕著とはいえない。しかしながら，無機態及び有機態窒素の分布についてみると，図－5－19に示した計算値の方が少なくとも定性的にはより現実に近い分布を再現しているように思われる。また，この点に関連して，クロロフィルa濃度の分布にかなりの差がみられるところがあるが，いずれが現実に近いかは実測値が少ないために明らかでない。



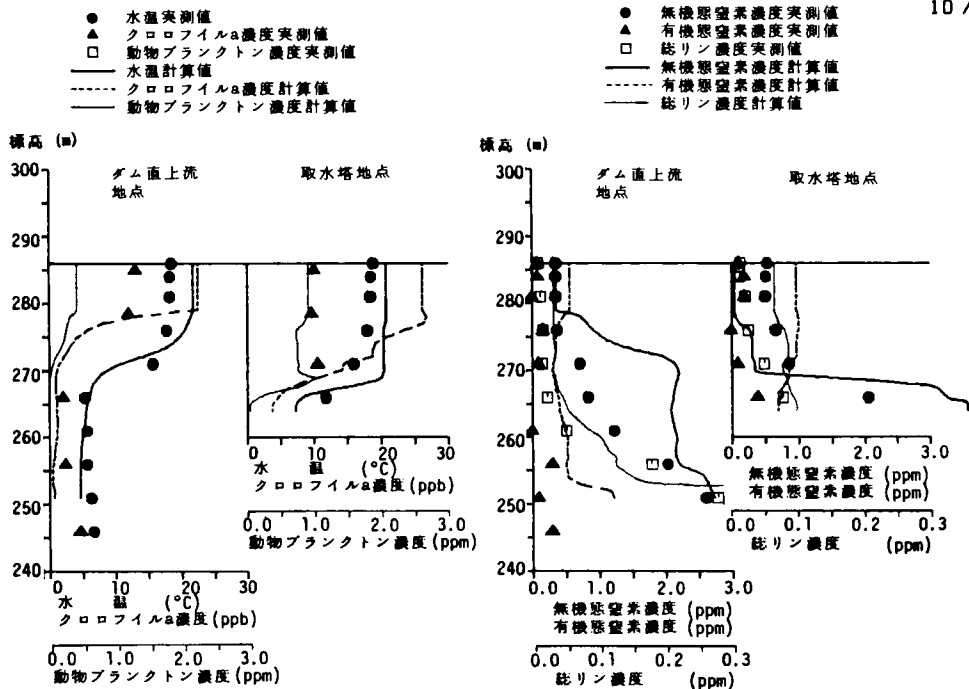
図一5-19(a) 改良モデルによる水温及び各種水質濃度分布の再現結果 (室生貯水池, 1977年2月22日)



図一5-19(b) 改良モデルによる水温及び各種水質濃度分布の再現結果 (室生貯水池, 1977年5月24日)



図一5—19(c) 改良モデルによる水温及び各種水質濃度の再現結果 (室生貯水池, 1977年8月23日)



図一5—19(d) 改良モデルによる水温及び各種水質濃度分布の再現結果 (室生貯水池, 1977年10月25日)

つぎに、図-5-20~22は、各水質濃度分布に関する計算結果をより詳細に検討するため、資料が整備されている日について、貯水池内全域での分布を実測値によるものと比較すると同時に、そのときの流速分布の計算結果を合わせて示したものである。計算値による各濃度分布の再現は良好であり、具体的には、クロロフィルa濃度が上流端よりやや下流の表水層で高濃度となり、その上下流及び水深方向へ濃度が徐々に低下していく様子や、それに関係する無機態窒素及び総リン濃度が流入部ならびに深水層で高濃度となり、中下流部表水層では低濃度となる傾向が十分に説明されている。

以上の結果では、(5-2)~(5-6)式の濃度収支則を用いて流れ方向に貯水池を細分割した解析を実施することによって、貯水池内における各種水質濃度の分布をより詳細に、しかも定性的には少なくともより精度良く再現しうることが確められた。また、これらの結果は、流出入水の流れの運動学的挙動ならびにそれに伴う流入栄養塩類の分布、さらには貯水池の複雑な幾何形状が、上述の解析によってより正しく反映されたものであるといっても過言ではない。そこで、以下では、これらの結果、とくに図-5-20~22に示した計算例を用いて、貯水池における富栄養化の特徴とそれに関係する流れの挙動とについて考察を進めることにする。

図-5-20~22に示した例は、図-5-19(b), (c)などからわかるように、安定した水温成層が標高270~275 mの位置に形成されていた期間における平常時のものであるが、流速ベクトル図よりこのときの貯留水の流れの特徴を述べると次のようである。

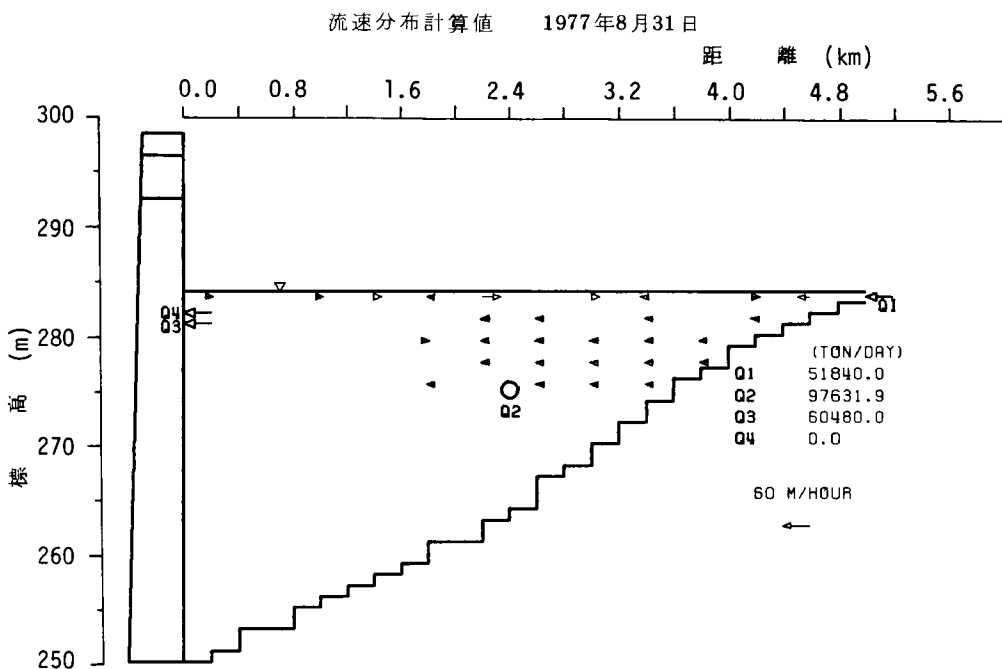
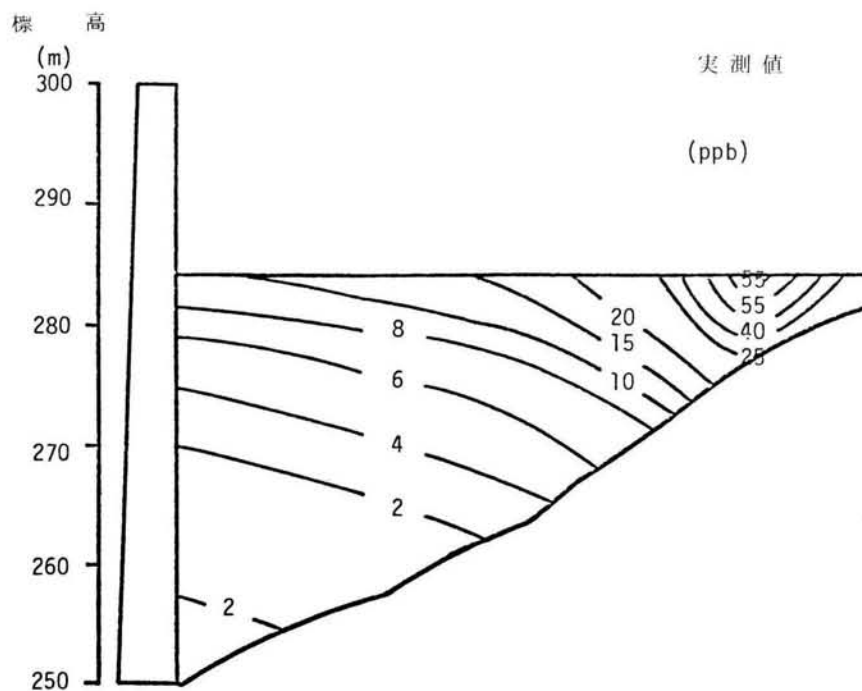
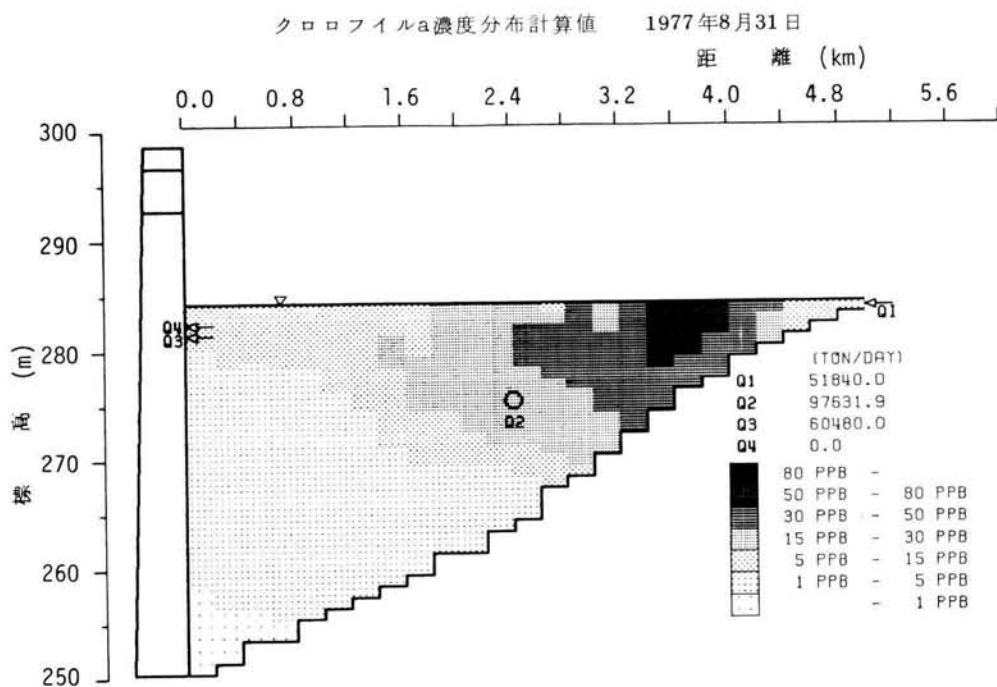


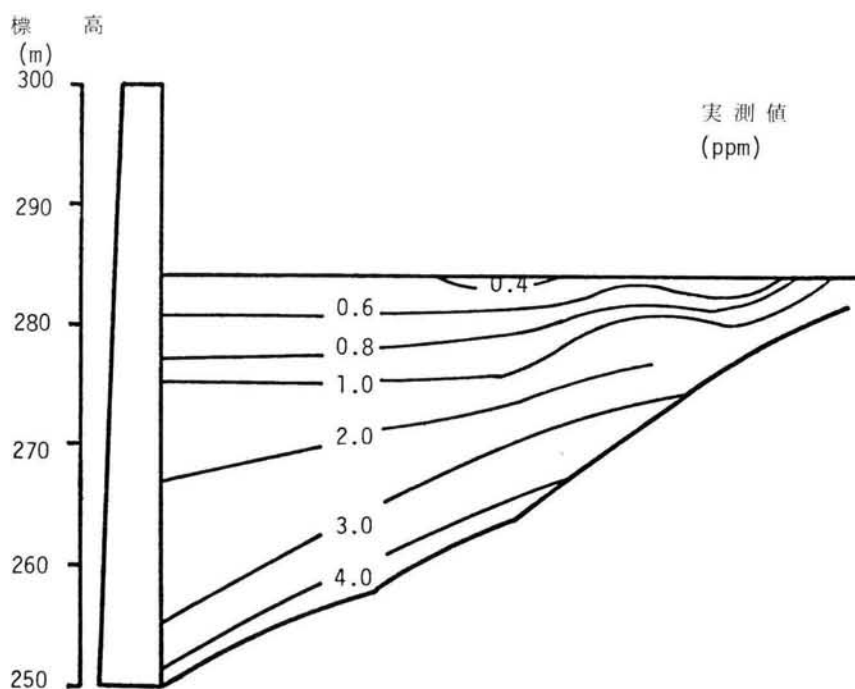
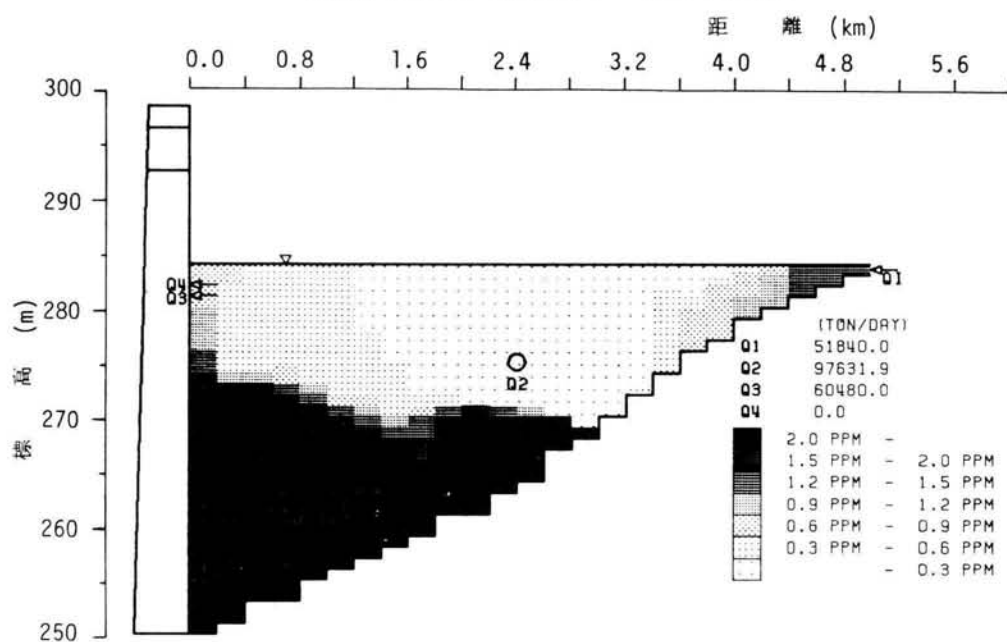
図-5-20(a) 1977年8月31日における流速分布の計算結果



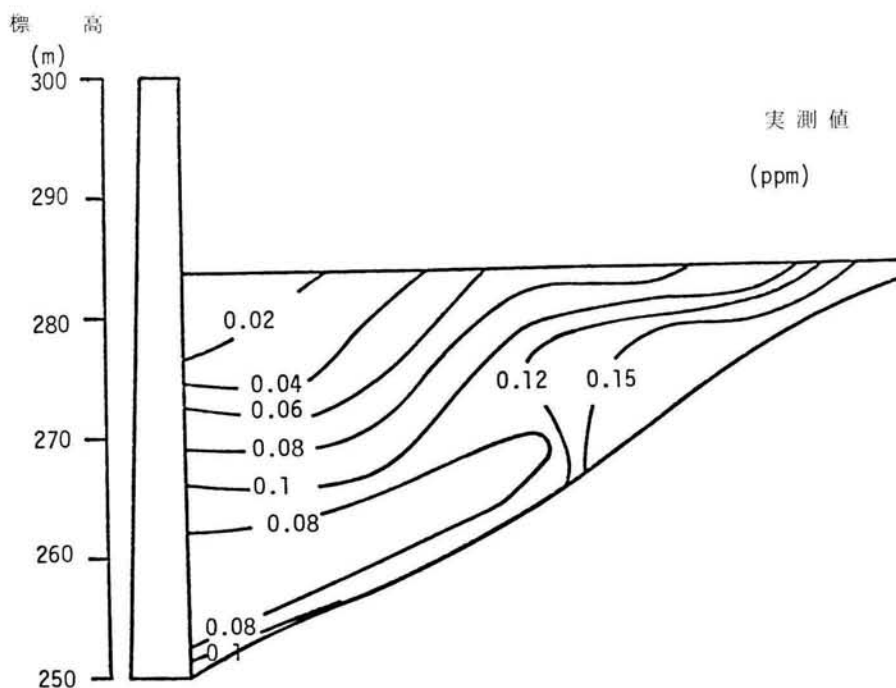
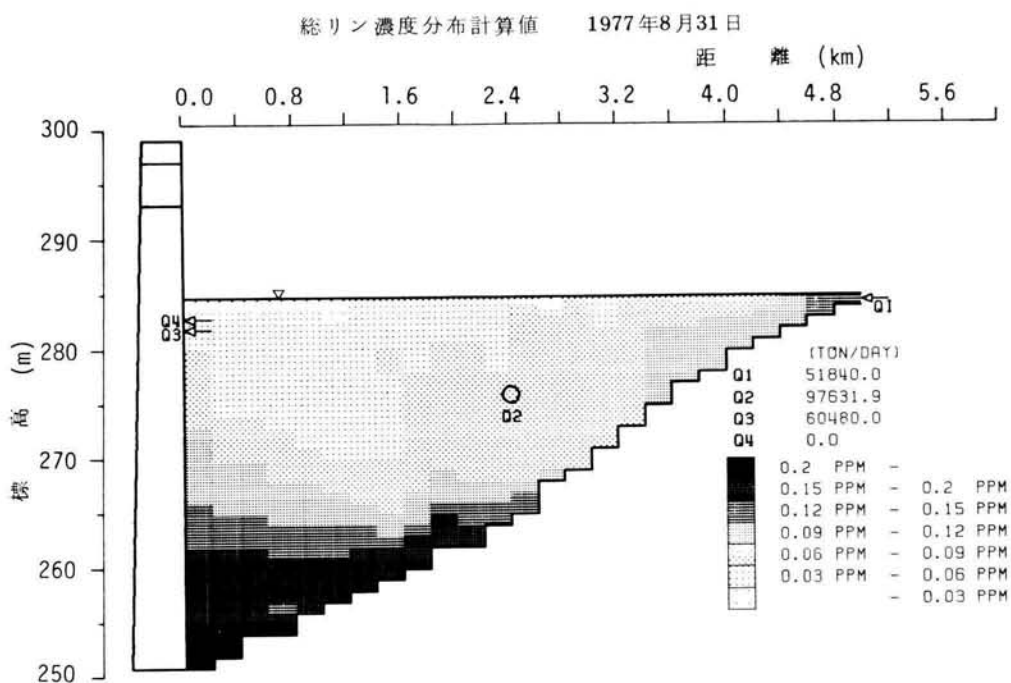


図一五—20(b) 1977年8月31日におけるクロロフィルa濃度分布の計算結果と実測値による分布

無機態窒素濃度分布計算値 1977年8月31日



図—5—20(c) 1977年8月31日における無機態窒素分布の計算結果と実測値による分布



図—5—20(d) 1977年8月31日における総リン濃度分布の計算結果と実測値による分布

室生貯水池では、5.2.で述べたようにダムでの表層取水（図中の $Q_3$ ）に加え、貯水池中央付近に設置された取水口からの取水（ $Q_2$ ）が実施されているため、この影響によって、上流側では流入水が表層水を連行しながら取水口のある水深にまで拡がる形で表水層内を流下するのに対し、その下流側ではダム取水口へ向かう流れの速度が減じられ、一部で逆に上流へ向かう流れが表わされている。また、下流側では、表面付近を除くと流速は極めて小さく（各図においては6 m / hour のところは何も描かれていない）、深水層内の水は停滞していると考えてよい。9月30日の例では、流入流量が他の日に比べて大きいいため、流れの層は水深方向により拡大し、その層内をほぼ一様に流下する様子が表現されている。

図-5-20~22において、流速分布と各水質濃度分布とを対応させてみると、いま述べたような流れの特徴が各水質濃度の分布特性に大きな影響を及ぼしていることが理解できるであろう。すなわち、流入する窒素、リンは、貯水池中央部の取水口より上流側の表水層に移流・分散されるが、それより下流側への輸送はこの取水による影響によって妨げられ、また貯水池底より溶出する窒素、リンも、上流側では表水層内に輸送されるが、下流側では深水層内に滞留したままになる。このため、取水口より上流側の表水層では豊富な栄養塩の供給を背景に、植物プランクトンの増殖が活発化し、その結果としてクロロフィルa濃度の高濃度域が、高温かつ日射が十分な表面付近を中心に形成される傾向がある。一方、取水口よりダムにかけての領域では、上述したような理由から栄養塩の供給が十分に行われず、植物プランクトンの増殖が余り活発化しな

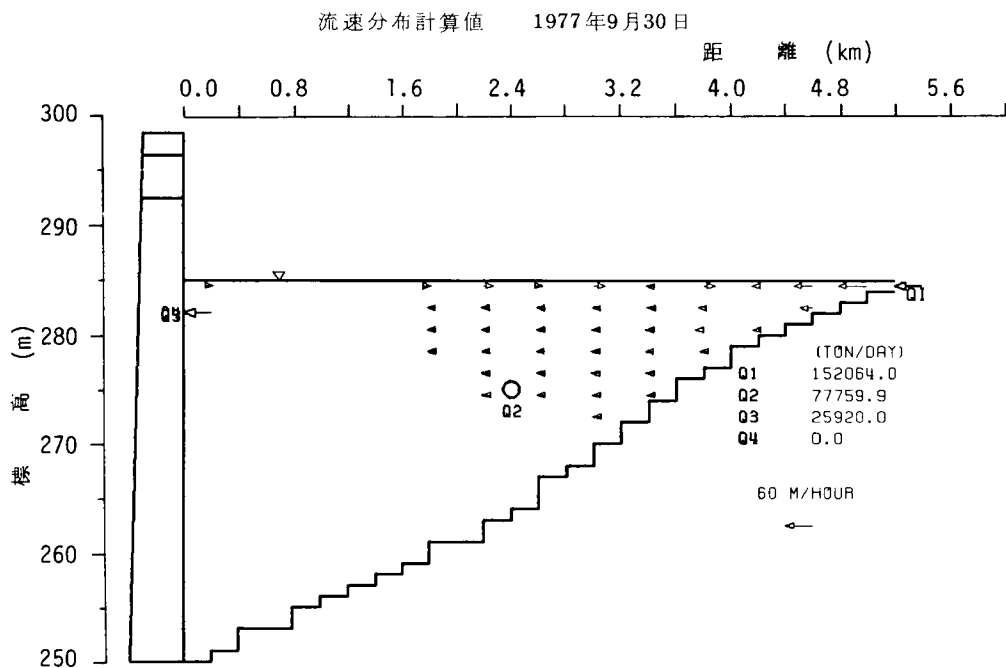


図-5-21(a) 1977年9月30日における流速分布の計算結果

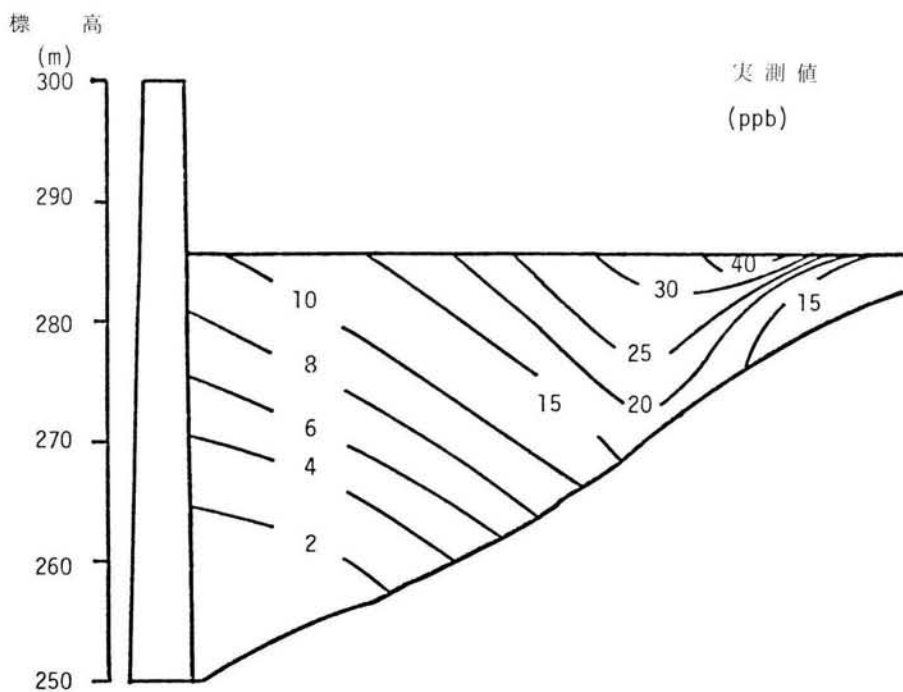
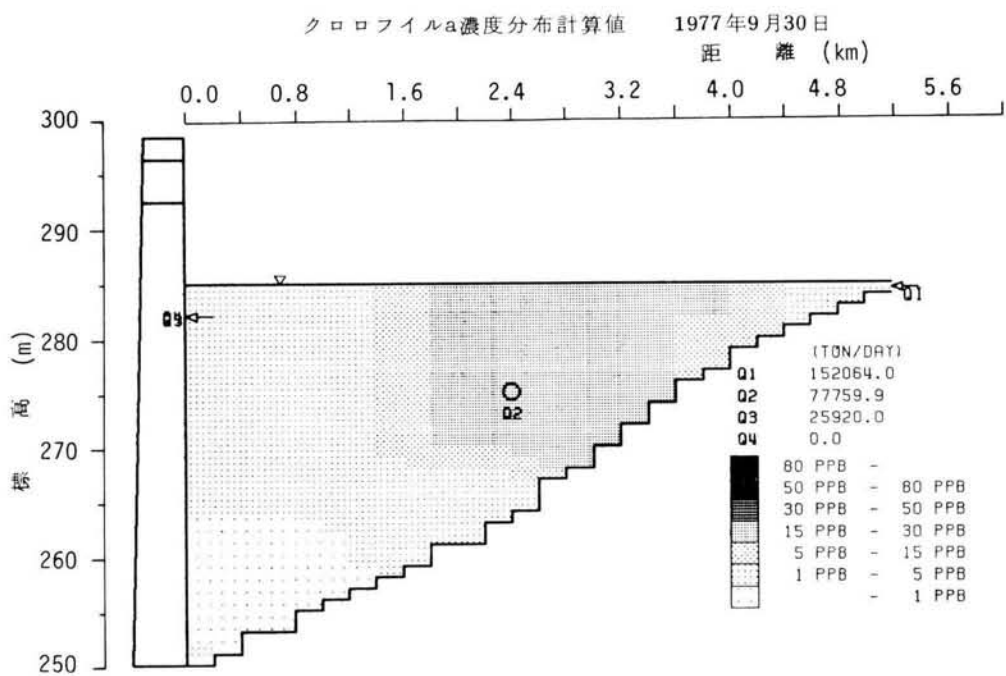
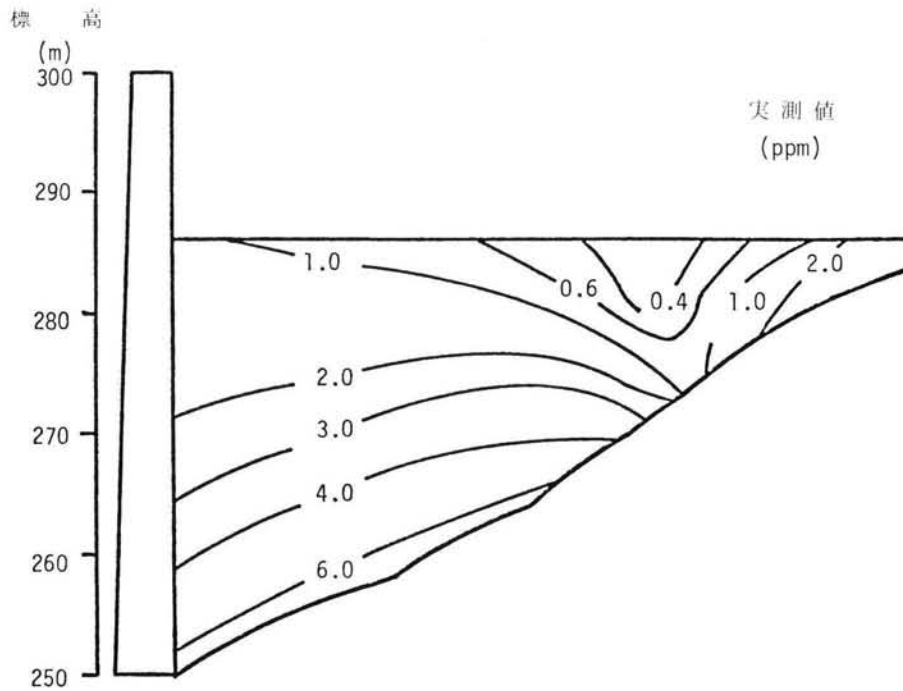
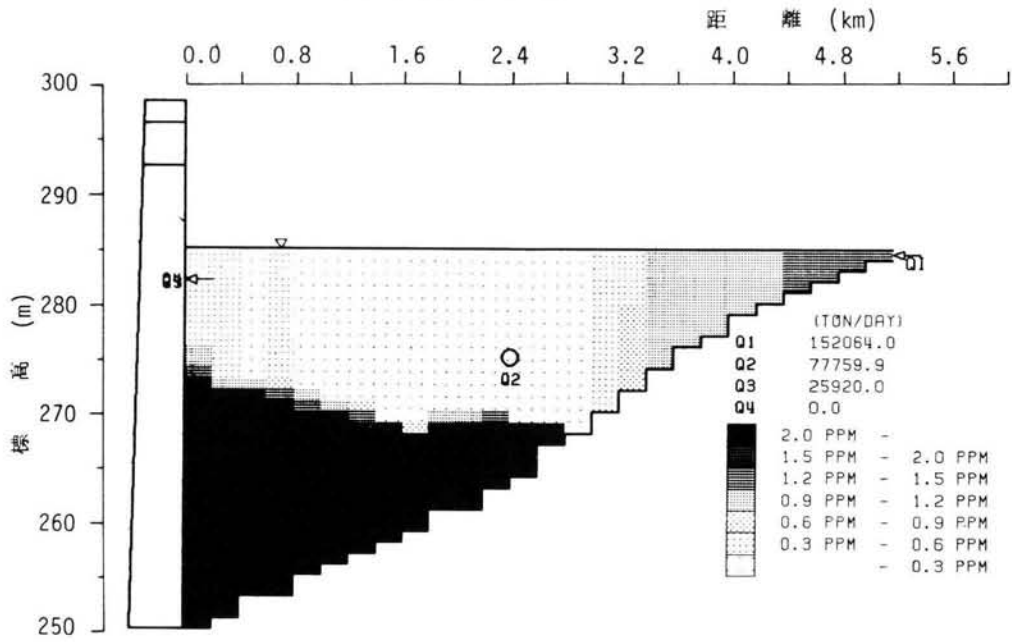
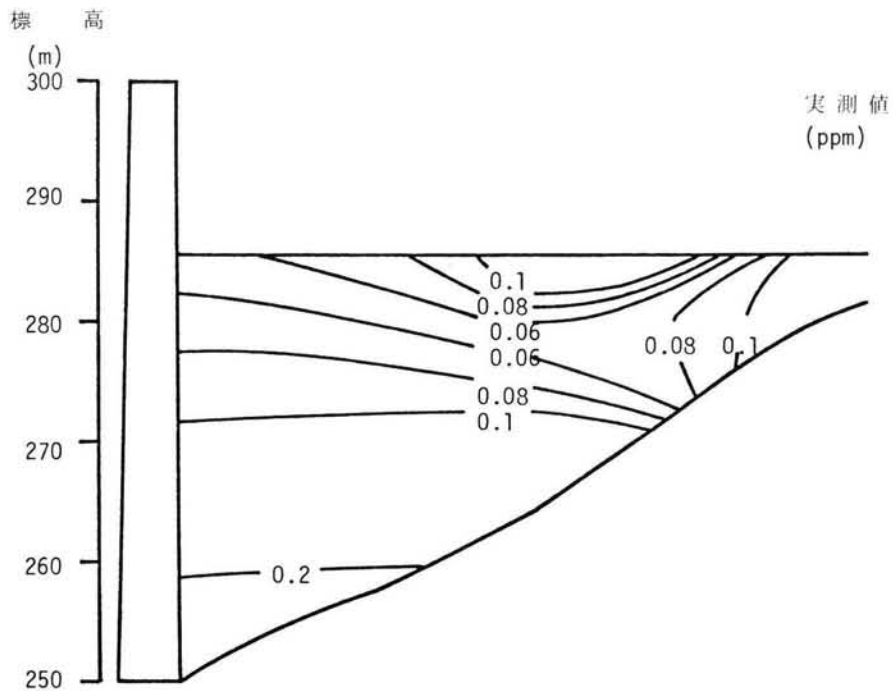
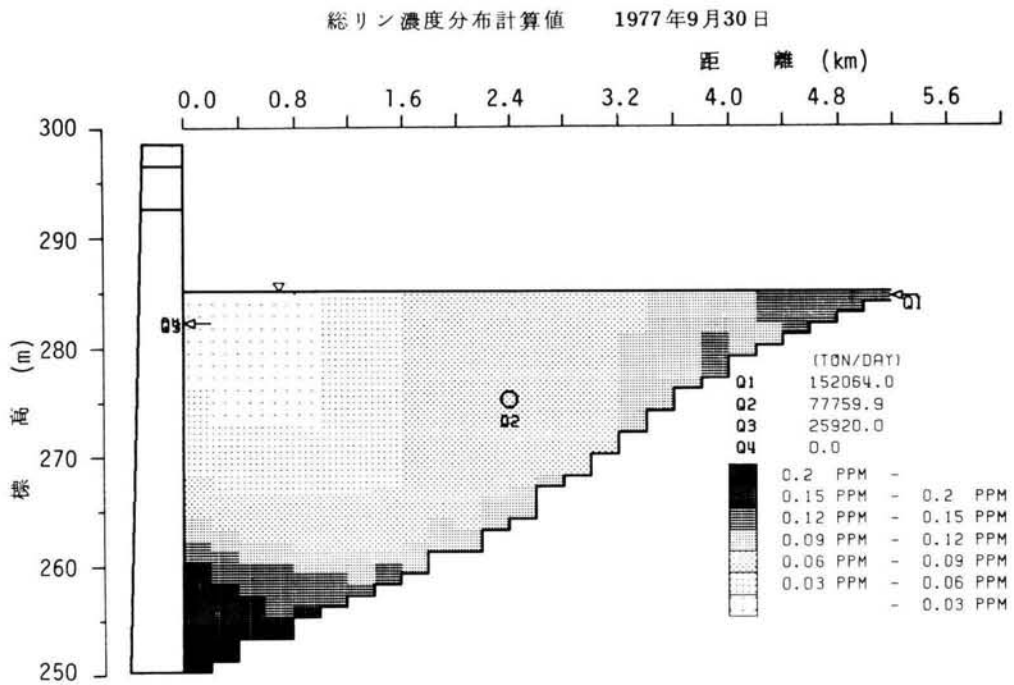


図-5-21(b) 1977年9月30日におけるクロロフィルa濃度分布の計算結果と実測値による分布

無機態窒素濃度分布計算値 1977年9月30日



図一五—21(c) 1977年9月30日における無機態窒素濃度分布の計算結果と実測値による分布



図—5—21(d) 1977年9月30日における総リン濃度分布の計算結果と実測値による分布

いために、クロロフィルa濃度の値は比較的低い。しかもその分布は、ダムでの表層取水口へ向かう流れの分布特性と対応するような形を示し、移流による移動量に一次的に支配される傾向を表わしている。こうしたクロロフィルa濃度の分布特性、すなわち富栄養化に関する生物学的生産に関する空間的特徴と流れの特徴との関連は、無機態窒素及び総リン濃度の分布特性からも理解できるであろう。

以上は、図-5-20~22に共通してみられる特徴を述べたが、さらに各図を詳細に比較してみると、流入流量の変化による水質分布への影響が明らかに認められる。すなわち、図-5-21に示した昭和52年9月30日の例では、他の例と比べて、流量がほぼ2~3倍程度であるため、先に述べたような流れの変化を生じ、各水質濃度の分布は水深方向及び流れ方向への移流量の増大を反映した形となっていることがわかる。

したがって、先に述べたような富栄養化関連要素の分布特性も、環境境界条件ならびにそれに伴う水理条件が異なる場合、例えば、洪水時及びその直後の期間や冬の循環期など、また諸条件の異なる他の貯水池においては、当然変わることが予想される。すなわち、富栄養化の現象は複雑であり、一概に述べられるものではない。そうした一例を図-5-23に示す。これは昭和52年4月及び6月末の洪水後の計算例であるが、いずれもクロロフィルa濃度は表水層全域にわたって高い値となり、先に述べた分布とは異なっている。これは、計算上、洪水時において大量の栄養塩が表水層全域に流入すると同時に、動物プランクトン濃度が流出によって低下した結果

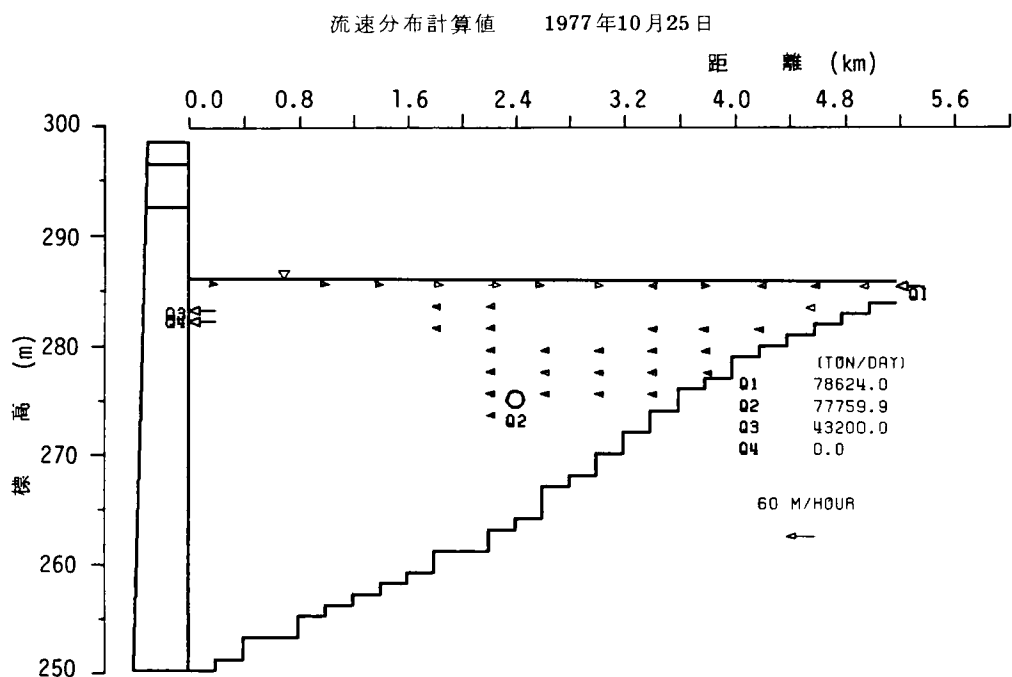
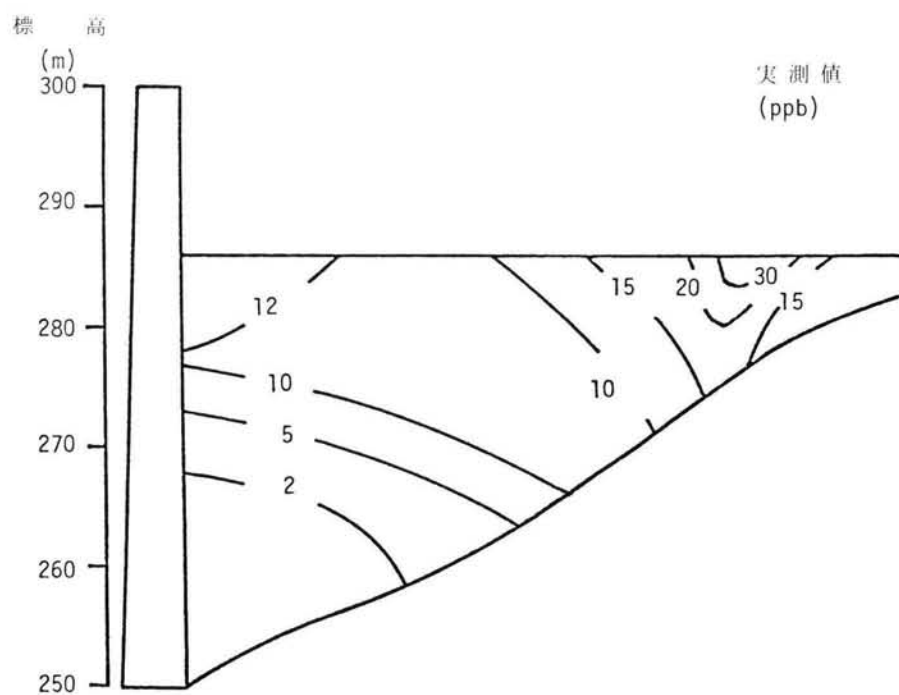
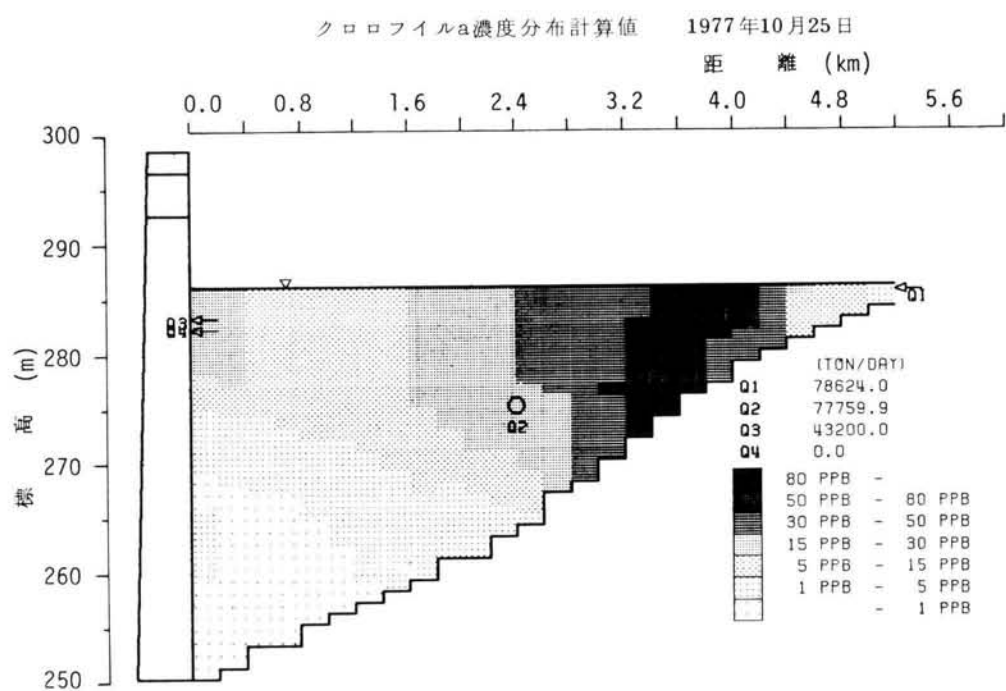


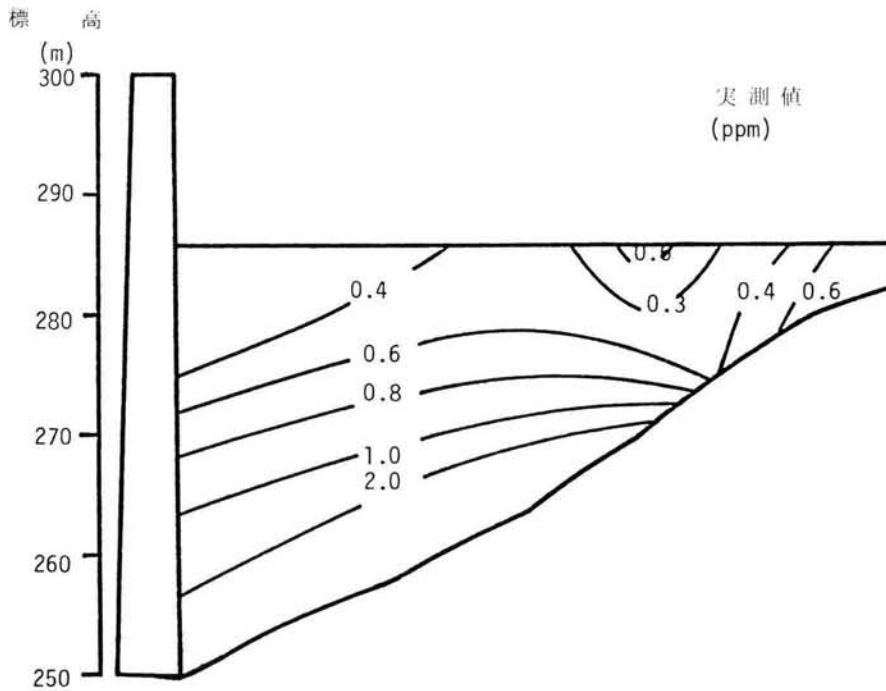
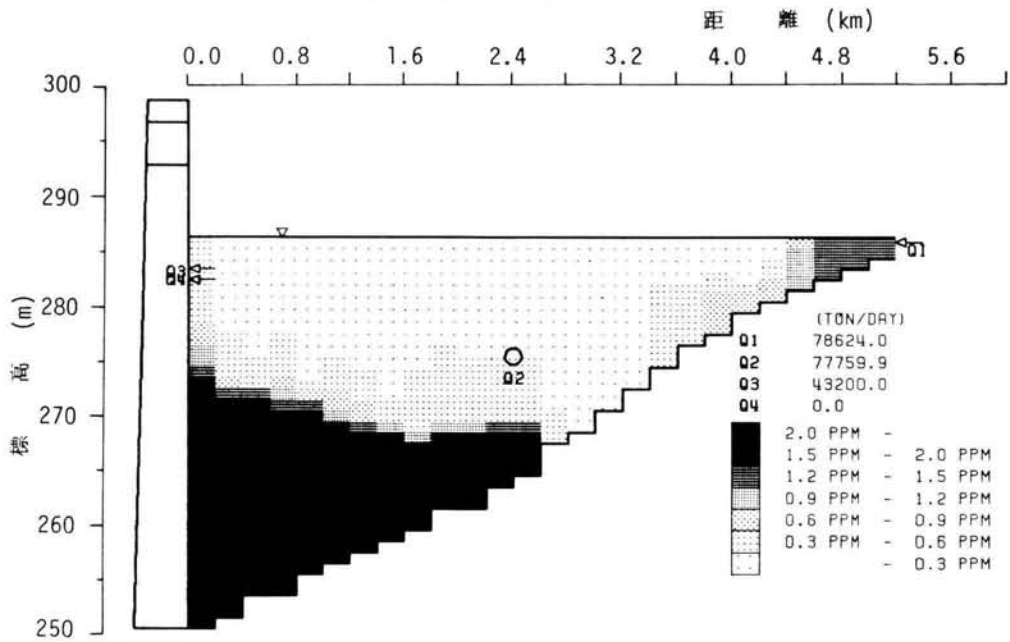
図-5-22(a) 1977年10月25日における流速分布の計算結果



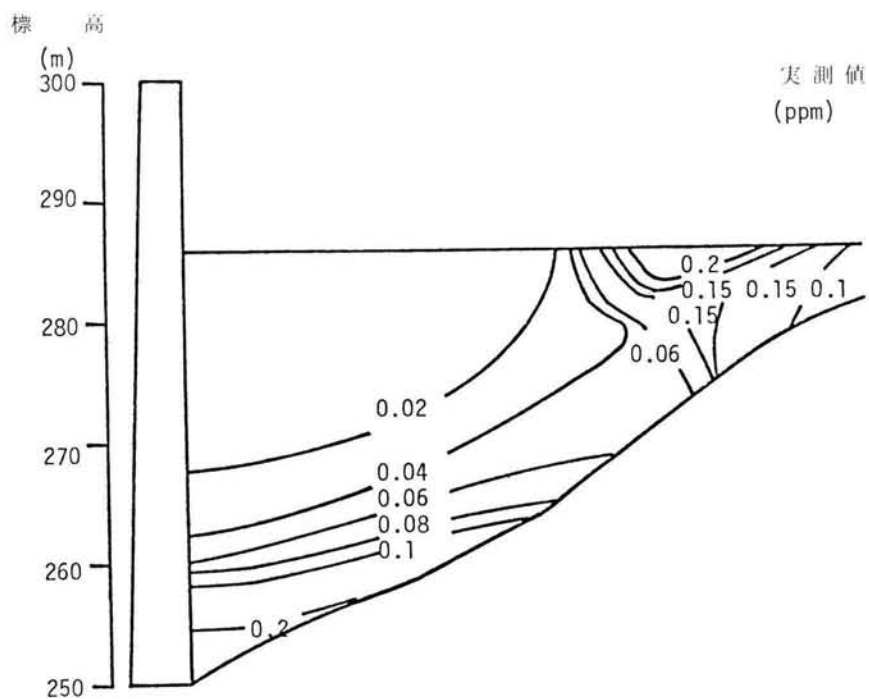
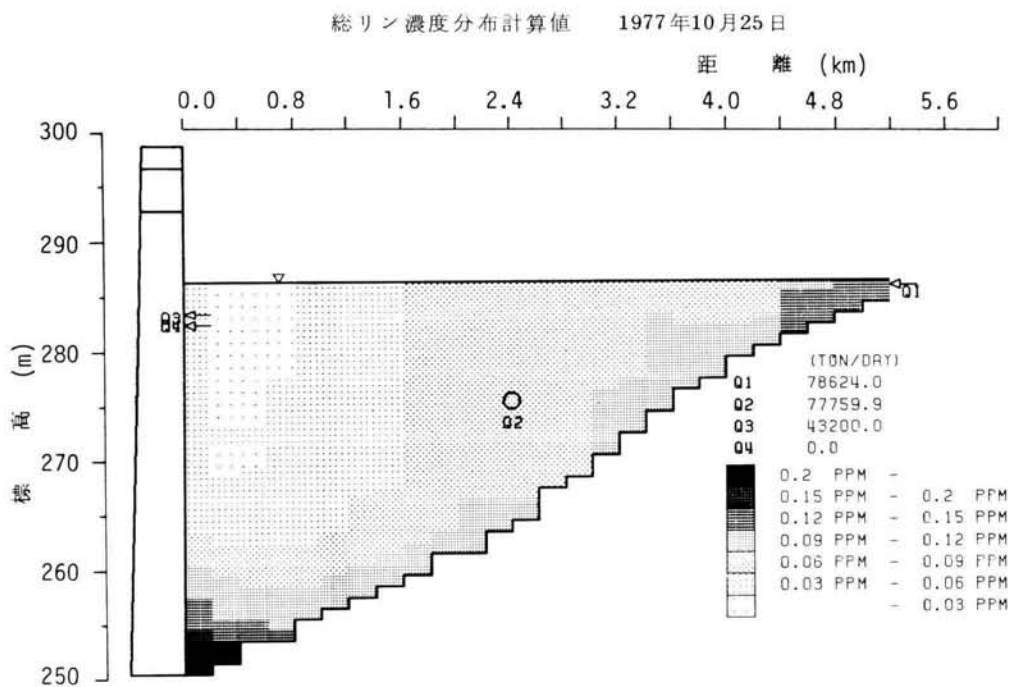


図一五—22(b) 1977年10月25日におけるクロロフィルa濃度分布の計算結果と実測値による分布

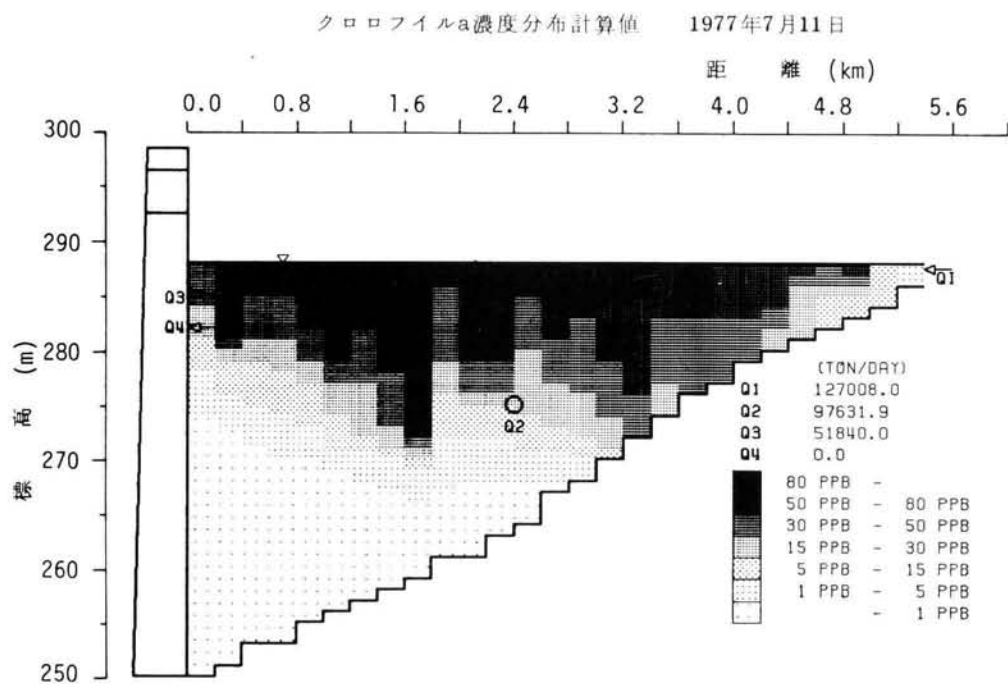
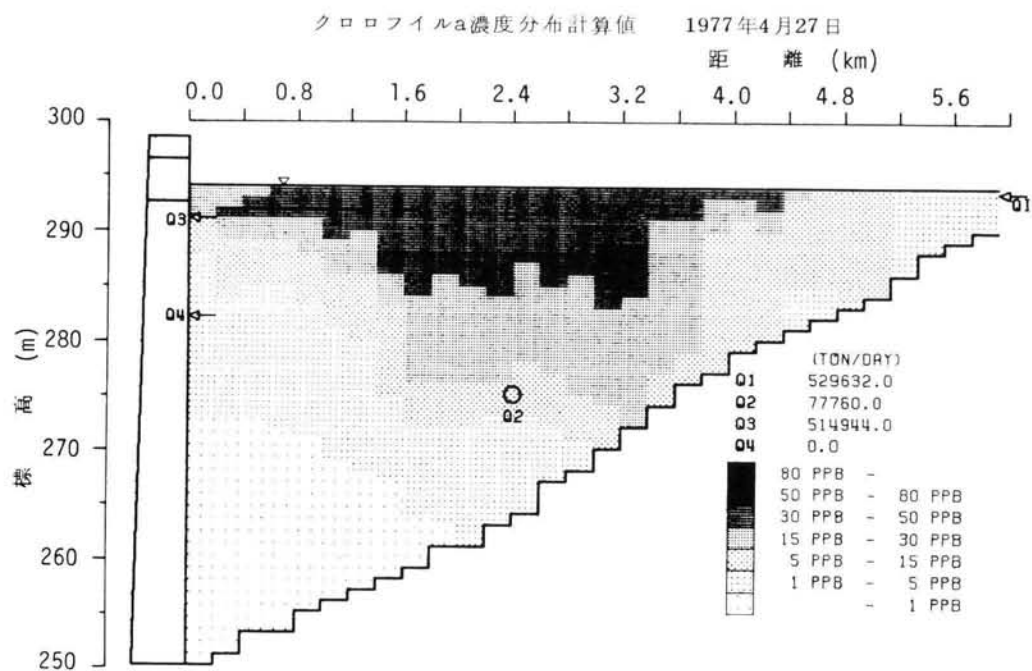
無機態窒素濃度分布計算値 1977年10月25日



図—5—22(c) 1977年10月25日における無機態窒素濃度分布の計算結果と実測値による分布



図—5—22(d) 1977年10月25日における総リン濃度分布の計算結果と実測値による分布



図一五—23 洪水後におけるクロロフィル a 濃度分布の計算例

である。一方、循環期においては、対流による水深方向への混合によって、深水層に存在する高濃度の栄養塩が表水層へ回帰され、それが春季における植物プランクトンの増殖に関係するといわれている。しかしながら、これらの期間におけるそうした現象に関する観測は十分でなく、その実態すら明らかでないのが現状である。こうした現象を含め、さらに多くの事例によって、貯水池における富栄養化の特徴とそれに関連する水理学的要素との関係をより明らかにしていくことが今後とも重要な課題であろう。

## 参 考 文 献

- 1) 松尾直規・岩佐義朗；貯水池における水理特性の変化とその予測，第24回水理講演会論文集，1980年2月，pp.251～258。
- 2) 仏原肇・岩佐義朗・松尾直規；貯水池水理モデルによる富栄養化のシミュレーション，第34回土木学会年次学術講演会講演概要集第Ⅱ部，1979，pp.237～238。
- 3) 森北佳昭・岩佐義朗・松尾直規；貯水池における富栄養化シミュレーションに関する考察，第35回土木学会年次学術講演会講演概要集第Ⅱ部，1980，pp.540～541。
- 4) 岩佐義朗・松尾直規・森北佳昭・荒川信広；流れの挙動からみた貯水池富栄養化現象の考察，昭和56年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要Ⅱ～25，1981。
- 5) Vollenweider, R.A.; Advances in defining critical loading levels for phosphorus in lake eutrophication, Mem, Ist Ital, Idrobio, Vol.33, 1976, pp.53.
- 6) 建設省近畿地方建設局木津川上流工事事務所；室生ダム湖水質汚濁調査報告書，1979。
- 7) 津野洋・相崎守弘・合田健；霞ヶ浦高浜入における藻類増殖のシミュレーションに関する研究，国立公害研究所研究報告第6号，1979，pp.273～280。

## 結 論

本研究では、貯水池における貯留水の質的管理に関する3つの課題、すなわち冷水、濁水長期化及び富栄養化の実態とそれらの特徴を、時間的・空間的スケールより明らかにするとともに、得られた知見に基いて、各課題に関係する貯水池水理の解析モデルとその数値解析法を論じ、さらに、それらを用いて実際の貯水池における各課題の数値解析を実施してその結果を水理学的に考察した。本研究で得られた主要な成果を要約すると以下のようである。

1. 第1章では、まず、比較的長い時間スケールよりみたわが国の多目的貯水池の水理・水文的性格とその評価・分類法について論じ、次の結果を得た。
  - i) 貯水池の水理・水文的性格は、洪水の流入の有無など環境境界条件の変動に応じて、成層型、中間型及び混合型のいずれにも変化しうることがある。
  - ii) これらの性格は、太陽エネルギー活動の最も活発な7月を基準にとった月平均回転率 $\alpha'$ と7月の平均水量に基く内部フルード数 $F_D$ を用いると、従来の分類法によるよりも、より明確に分類できることがわかった。具体的には成層型の年に $\alpha'$ と $F_D$ の間に一次的な関数が成立し、これより外れると中間型、混合型となる傾向があることを多くの現地観測の結果より実証した。
  - iii) 全国数十ヶ所の主要な多目的貯水池を対象に長期間の資料を整理した結果、7月の $F_D$ の値が0.01以下で成層型、0.01～0.03で中間型、0.03以上で混合型となる傾向が認められた。また $\alpha$ では10以下、 $\alpha'$ では1以下で成層型となるが、それ以上については一概にいえない。
  - iv) 貯水池の水理・水文的性格は、貯水池規模ならびに幾何形状、さらには気候・風土とも密接に関連することを指摘した。

ついで、貯水池における冷水、濁水長期化及び富栄養化に関係する水理要素の時間的・空間的变化の実態を実測資料より調べ、それらの特徴とスケールについて考察した。その結果、次のような知見が得られた。

- i) 成層型貯水池における夏季水温成層は貯水池幅方向及び流れ方向にはほぼ一様で、水深方向にのみ変化し、また、時間的な変化も比較的緩やかで、季節的なものであるといつてよい。ところが、洪水の流入があると水温成層は変形・破壊されることがあり、とくにこれが秋季の循環期の初めに起るときには濁水長期化等に大きく影響を及ぼす。
- ii) 洪水の流入による水温成層の変形・破壊は、30分～2時間程度の間を生起するごく短い時間スケールの現象である。変形・破壊の判定基準は、内部フルード数 $F_D$ と洪水期間中の回転率 $\Sigma Q_{out}/V_0$ によって与えられるようであり、天ヶ瀬貯水池の例では、 $F_D$ がほぼ0.4以上、 $\Sigma Q_{out}/V_0$ が、1.4以上となったとき破壊が生じた。また、成層の低下は、従来の選択取水式

を用いてほぼ推定しうるようである。

- iii) 洪水時及びその後の濁水現象は、比較的短い時間スケールの現象である。成層型貯水池におけるこのときの濁度分布は、洪水の規模や水温成層の挙動等に応じていくつかの形態を示すが、いずれの場合も、濁度は水深方向ばかりでなく流れ方向にも変化し、しばしば種々のスケールの濁水塊を形成する。濁水長期化は成層破壊時及び一様水温期にとくに深刻なものとなる。
- iv) 富栄養化に関する各種水質濃度の分布は、生物学的生産・消費の季節的变化を反映し、有光層及び水温成層の位置と密接に関連した水深方向への変化を示すが、流れ方向にも濁度と同様に顕著な変化を示すことがある。また、貯水池でのこうした変化は、流出入水の流れの運動学的挙動にも関係しているが、その関係は現在のところ十分には明らかでない。

2. 第2章では、第1章で得られた知見に基いて、貯水池における水温、濁度及び富栄養化の分布とその変化を水理学的に取り扱う数学モデルの開発について述べ、得られた水温、濁度ならびに富栄養化予測のための数学モデルを説明した。

まず、貯水池水理に関する従来の各種予測モデルを概括し、それぞれの特徴と問題点を考察した。その結果、従来のモデルに共通した次の問題点が明らかにされた。

- i) 流れ方向に水平な夏季水温成層を対象とする場合はともかくとして、濁度及び富栄養化を対象とするときには、それらの空間的一様性やスケールに応じて、水平層を流れ方向にも分割したものをコントロール・ボリュームとしなければならないが、この点の認識が十分に行われているとはいえない。
- ii) 貯留水の流れの運動学的挙動の表現に、運動量保存則を用いることなく、各種の選択取水式を代用し、さらに流入水が同密度層へ流入するなどの仮定を用いているため、境界条件の変化に対応して複雑な挙動を示す実際の流れの運動を厳密に明らかにすることが期待できない。

つぎに、これらの問題点を解決し、貯水池水理をより忠実に取り扱うための数学モデルが、流体力学原理を出発点に、実際の貯水池における水理特性に基いて、コントロール・ボリューム法に従って展開された。その結果、貯水池における水温、濁度予測のための数学モデルが得られたが、これは貯水池を水深方向及び流れ方向に分割したブロックについて展開されたもので、従来無視されてきた運動量保存則を用いて流れの運動学的挙動を忠実に表現した点にその特徴と意義がある。

さらに、このモデルを応用した貯水池の富栄養化予測のための数学モデルが、富栄養化指標の選定とその濃度収支則、とくに生物学的生産・消費に関するモデリングを行うことにより開発された。

3. 第3章では、第2章で開発された各予測モデルを実際の貯水池に適用して水温、濁度及び富栄養化に関する各種水質濃度の分布とその変化を求めるための数値解析法と各種の解析条件を説明した。

まず、開水路流れを対象とした数値解析法を概説し、そのうちから、staggered schemeによる

up-wind-difference 法を用いた貯水池水理の数値解析のアルゴリズムを明らかにした。また、計算時間を短縮するための方法として、圧力項を implicit な差分で置き換えた計算法と、圧力項を省略した簡易計算法を同時に示し、各計算法の安定性のための必要条件ならびに近似精度を検討した。一方、富栄養化を対象とした数値解析では、生物学的生産・消費項に起因する不安定を防ぐため、Runge-kutta 法を用いて計算が進められることを説明した。

つぎに、実際の貯水池を対象とした数値解析の実施にあたって必要とされる環境境界条件及び初期条件、さらには各種の水理条件の取扱いを説明すると同時に、それらに関するいくつかの問題点を検討した。その結果、これらの条件のうちのいくつかについて、次のような取扱いを提案した。

- i) 流入濁度及び各種の流入水質濃度は、流量との関係を表わす慣用式(3-25)式により推定しうが、この関係は短い時間スケールでみれば一定したものではなく、前期降雨の有無、流域の安定度、さらには人為的影響等により、一つの流域でもかなり変化するため、その変化に応じて(3-25)式の定数を変えていく方がより現実的である。
- ii) 貯水池へ流入する濁質及び貯水池内に存在する濁質の粒度分布は流入流量あるいは流入濁度等の値に対応して変化するため、濁度成分をいくつかの粒径グループに分け、それぞれについて濁度収支則を適用して、その重ね合せによって全体の濁度を求める計算法を考え、濁質粒度の時間的・空間的变化を考慮したより現実的な取扱いを提案した。
- iii) 分散係数の値は明らかにできないが、流量と乱れの強さとの相関を考え、各水理量に対する分散係数の値を流量の一次関数で仮定した。
- iv)  $\Delta x$  及び  $\Delta z$  の値は、水理学的意味においてはもちろんのこと、数値解析の適合性の面からも重要であり、後者の観点からは  $\Delta x = 500 \sim 1000 \text{ m}$ 、 $\Delta z = 1 \sim 2 \text{ m}$  程度の値を用いれば実用上の支障は生じないことを指摘した。

**4. 第4章では、第2章で得られた貯水池の水温、濁度予測モデルを第3章で説明した数値解析法を用いて実際の貯水池へ適用したいくつかの例を示し、その結果を現象の再現性ならびにそれに関与する諸条件の技術的取扱いの観点より考察した。得られた結果は次のようである。**

- i) まず、第3章で提案した各種解析条件の取扱いについて検討した結果、上述した ii) ~ iv) の取扱いが実際現象を再現する上で有効かつ妥当なものであることを示した。なお、コントロール・ボリュームの大きさに関しては、洪水時における濁水の伝播過程を対象とするような場合には、さらに  $\Delta x$  を 100 m 程度としてより細かく分割する必要があることが明らかとなった。
- ii) 第2章で説明した予測モデルを実際の貯水池へ適用した結果は、いずれの貯水池においても良好であり、モデルの有効性及び妥当性、さらには汎用性が実証された。
- iii) 第3章で説明した3種類の数値解析法を用いて計算した結果の比較では、圧力項を省略しない explicit 法によるものが最も精度が良いことが確められたが、partial implicit 法によるものは定性的にはともかく、定量的には水面勾配(圧力項)を省略した簡便法によるものと大差は



なく、精度的には explicit 法より劣ることがわかった。

iv) 簡便法による計算結果は上述の explicit 法によるものと比べると精度的にはやや劣るが、実用上は十分な所要精度を有しており、計算時間を大幅に短縮できることを考えると、実用的には極めて有利な方法である。

5. 第5章では、第2章で得られた富栄養化の予測モデルを室生貯水池に適用した例について検討するとともに、それに基づいて富栄養化予測モデルの改良を試み、適用結果を水理学的に考察した。結果は次のようである。

i) 貯留水の運動学的挙動及び水温を富栄養化に関係する各種水質濃度と連立して求めることにより、富栄養化に関係する水理学的因子の影響が正しく把握されるとともに、実際現象が少なくとも定性的にはより忠実に再現されうようになった。

ii) 富栄養化に関係する各種の水質変化機構を数値解析結果に基づいて考察した結果、生物学的生産・消費とともに、移流による物質輸送が貯水池の富栄養化過程に重要な役割を果たすことがわかった。

iii) 生物学的生産・消費モデルをさらに改良し、より小さな  $\Delta x$  の値を用いて、詳細な数値解析を実施した結果、現象再現精度がより向上することが確められた。同時に、水温成層形成期における平常時のクロロフィル a 濃度が、流入水の運動学的挙動とそれに伴う流入栄養塩の分布の影響を受け、流入端直下流部において高濃度になることを、水理学的に明らかにした。

以上、貯水池における水理特性とその定量的な取扱いならびにその実際現象への適用結果について要約したが、本文中でも述べたように、貯水池へ流入する濁度ならびに各種水質濃度の特性や、対流混合、分散係数、濁質の性状及びその沈降特性、さらには生物学的生産・消費に関することなど、貯水池水理をより明らかにするにはさらに多くの実測資料の集積と、それに基づくこれら不確定要素の解明が必要である。また、実際現象の把握に基いた濁水長期化ならびに富栄養化に対する技術的対策手段の樹立も今後の大きな課題である。本論文で示した解析法がこうした対策の樹立とその評価、さらには、今後の貯水池計画を策定する上での有力な情報を与える手段となれば幸いである。

最後に、本研究を進めるにあたって、終始懇切な御指導を賜った京都大学工学部教授、岩佐義朗先生に心より感謝の意を表します。また、数値解析に関することなど、常に適切な助言をいただいた京都大学工学部井上和也助教授ならびに綾史郎助手にも深く感謝する次第です。

さらに、本研究に用いた多数の貴重な資料を御提供いただいた建設省近畿地方建設局淀川ダム統合管理事務所、同木津川上流工事事務所、建設省四国地方建設局、水資源開発公団、徳島県、ならびに四国電力の関係各位に深甚なる謝意を表します。

末尾になりましたが、本論文の作製にあたって多大なる御協力をいただいた京都大学工学部土木工学教室河川工学研究室の諸兄に改めて厚く感謝いたします。